

3. Темлянцев М. В., Матвеев М. В., Темлянцева Е. Н. Исследование влияния различных факторов на обезуглероживание периклазоуглеродистых ковшовых огнеупоров // Известия вузов. Черная металлургия. 2011. № 10. С. 32 – 36.

УДК 669.045

И. Г. Товаровский, А. Е. Меркулов

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины,

г. Днепропетровск, Украина

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТЕЙ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ, ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ТЕПЛОСЪЕМА СО СТЕН НА ПРОЦЕССЫ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Аннотация

Влияние кинетических характеристик шихты на показатели и процессы доменной плавки изучалось с помощью многозонной математической модели, включающей 120 локальных объемов, связанных между собой единой системой материально-теплового баланса, и отвечающей требованиям системности анализа и адекватности одновременного отражения всех процессов по всем параметрам. Показано количественное влияние скоростей теплопередачи, восстановления и теплосъема со стен на расход кокса и процессы плавки. Выявлены закономерности трансформации температурно-концентрационных, фазовых и газодинамических полей в объеме ДП, а также поперечных перетоков газа по высоте столба шихты при изменении кинетических характеристик шихтовых материалов.

Ключевые слова: доменная плавка, кинетические характеристики шихты, трансформация температурных полей, технологический режим.

Abstract

Effect of the kinetic characteristics of the charge on the indexes and processes of the blast furnace smelting has been studied by means of a multi-zone mathematical model, which includes 120 local volumes linked by a single system of material and thermal balance, and appropriate to the requirements of the systems analysis and the adequacy of the simultaneous reflection of all the processes in all respects. Displaying the quantitative effect of the rate of heat and mass transfer, heat removal from the walls on coke consumption and smelting processes. Revealed regularities of transformation temperature - concentration, phase and gas-dynamic fields in the volume of the BF, as well as cross-flows of gas through the column height of the charge with changing the kinetic characteristics of the charge materials.

Keywords: blast-furnace smelting, the kinetic characteristics of the charge, the transformation temperature fields, the technological regime.

Совокупность металлургических свойств шихтовых материалов, формируемых при различных целевых установках их производства, включает также комплекс свойств, называемых кинетическими характеристиками, от которых зависят скорости тепломассопередачи и фазовых превращений в столбе шихты.

Выполненный ранее анализ показал [1; 2], что на данном этапе познания процессов детальное описание зависимостей кинетических констант теплопередачи и восстановления от первичных факторов не дает ожидаемых результатов.

Определенные по критериальным уравнениям значения объемного коэффициента теплопередачи в целом для столба шихты более чем на порядок превышают правдоподобные величины, установленные экспериментально на доменных печах. Это обусловлено зависимостью этого коэффициента от ряда факторов и особенно от степени неравномерности распределения материалов и газов по сечению столба.

Еще более противоречивы выражения кинетических характеристик восстановления, содержащие большое количество взаимосвязанных псевдоконстант, которые нужно определять в лаборатории и уточнять на доменных печах. При этом они также сильно зависимы от степени неравномерности распределения материалов и газов по сечению столба.

В этих условиях задача может быть решена, если относить величины коэффициентов теплопередачи и восстановления не к печи в целом, а к небольшим локальным объемам, в пределах которых распределение материалов и газов по сечению столба можно принять равномерным. При этом форму температурных и концентрационных зависимостей скоростей теплопередачи и восстановления в кинетических уравнениях следует принимать простейшей, так как ее усложнение не дает, как правило, более точных результатов на фоне других допущений и огрублений. Такой подход позволяет ограничить количество коэффициентов, которые нужно определить при адаптации модели к реальным параметрам и показателям плавки, и создает возможность решение задачи.

Решение реализовано в рамках разработанной в Институте черной металлургии НАН Украины многозонной математической модели процессов доменной плавки [3], отличающейся тем, что на основе структурной увязки многозонных по высоте и радиусу доменной печи и общих балансов масс и теплоты увеличены прогнозные возможности модели, в том числе по установлению новых количественных связей процессов и выявлению влияния неравномерности распределения материалов по радиусу печи на показатели плавки.

Решение общей задачи осуществляется в два этапа – эталонирование и прогноз. В ходе первого этапа на базе фактических показателей и параметров плавки и агрегата производится адаптация величин коэффициентов, характеризующих скорость тепло- и массообмена для данного сочетания шихтовых материалов. Исходя из того, что количество одновременно настраиваемых коэффициентов должно быть минимальным, за счет свертки информации оно сведено к трем адаптируемым элементам (АЭ):

1. АЭ объемного коэффициента теплопередачи в столбе шихты – α_v , кВт/[(м³·К)·(кПа·м) 0,333], входящий в выражение $\alpha_v = \alpha_0 \cdot \sqrt[3]{\Delta P}$ [3] и отнесенный к 1 градусу разности температур подведенного снизу к слою газа и поступающей в слой сверху шихты. В отличие от общепринятого отнесения коэффициента к средней разности температур газа и шихты в слое при неопределенности формы усреднения указанная форма дает более предметную интерпретацию коэффициента теплопередачи. Полученные при адаптации к реальным условиям отдельных доменных печей в разные периоды значения α_0 в пределах 0,4÷0,7 соответствуют (при потере напора в столбе шихты 5 кПа/м) величинам объемного коэффициента теплопередачи в столбе шихты – $\alpha_v = 0,7 \div 1,2$ кВт/(м³·К), которые близки к наиболее правдоподобным (в т. ч. экспериментальным) данным [1].

2. АЭ коэффициента скорости восстановления железа – k_v , 1/(час·К) (в числителе – доли кислорода оксидов железа, в знаменателе – доли восстановительного потенциала газа) отражает развитие прямого и косвенного восстановления, зависящее от комплекса свойств железорудного сырья и кокса.

3. АЭ коэффициента теплосъема со стен – q_o , кДж/(т·м²·К) отражает суммарную теплопередачу через стены при охлаждении от температуры периферийного газа на каждом горизонте до температуры отходящего потока охлаждающей воды.

Каждый из них интегрально отражает комплекс кинетических свойств и энергоёмкость процессов теплопередачи в столбе шихты, восстановления и теплосъема со стен соответственно. Полученные при адаптации значения коэффициентов используются в качестве констант на этапе прогноза, в ходе которого устанавливается влияние технологических параметров плавки на процессы в печи и показатели ее работы при данном сочетании свойств шихтовых материалов.

Новый подход открыл дополнительные возможности анализа процессов и формирования мер по повышению эффективности плавки, включающие: выявление лимитирующей зоны по высоте и поперечному сечению печи; количественный учет повышенной тепловой нагрузки на газовый поток в периферийной зоне (за счет теплопотерь); учет перетоков газа на разных горизонтах из одних радиальных кольцевых зон (РКЗ) в другие; оценку развития восстановительного процесса, в частности степени прямого восстановления, в кольцевых сечениях по радиусу печи; установление влияния распределения материалов по радиусу печи на теплопотери, а также влияния всех технологических факторов на расход кокса с учетом изменения теплопотерь; оценку роли зоны размягчения и плавления (с учетом влияния степени восстановления железа и прихода щелочных оксидов) в формировании режимов плавки и соответствующих температурно-концентрационных полей печи.

Для оценки влияния кинетических характеристик шихты на показатели процессов доменной плавки использовали данные о работе доменных печей № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (далее «АМКР») полезным объемом 5000 м³ и №5 ОАО «Северсталь» полезным объемом 5500 м³ в характерные периоды их работы, принятые в качестве базовых. Невязки баланса газифицированных элементов в базовых периодах минимизировали путем корректировки состава колошникового газа на ДП-9 и содержания кислорода в дутье на ДП-5 – параметров, наиболее вероятно вносящих по результатам анализа, наибольшие погрешности. Далее для каждого базового периода выполнили эталонирование с определением величин адаптируемых элементов коэффициентов теплопередачи в столбе шихты – α_v , восстановления железа – k_v и теплосъема со стен – q_o . Расчеты показали, что для разных периодов плавки и разных печей каждый из коэффициентов изменяется в определенном диапазоне значений, который составляет:

$$\alpha_o = 0,4 \div 0,7; k_v = 0,5 \div 3,0; q_o = 0,2 \div 0,5.$$

Аналитическое исследование влияния кинетических коэффициентов на процессы и показатели плавки.

Для анализа влияния величин кинетических коэффициентов на процессы и показатели плавки выполнили прогнозные расчеты для разных возможных их значений применительно к условиям ДП-9 «АМКР» при следующем распределении относительной рудной нагрузки (РН) в РКЗ колошника:

№ РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РН	0,49	0,98	1,08	1,08	1,08	1,03	1,08	1,09	1,09	1,23

Варианты расчетов определили разбиением диапазона изменения каждого параметра на 4 части и отдельно выделили максимальные и минимальные значения параметров. Получили следующий набор вариантов:

- 1) $\alpha_0 = 0,4 - 0,5 - 0,6 - 0,7$ при $k_v = 1,0$ и $q_0 = 0,3$;
- 2) $k_v = 0,5 - 1,0 - 2,0 - 3,0$ при $\alpha_0 = 0,5$ и $q_0 = 0,3$;
- 3) $q_0 = 0,2 - 0,3 - 0,4 - 0,5$ при $\alpha_0 = 0,5$ и $k_v = 1,0$;
- 4) $\alpha_0 = 0,4$ при $k_v = 0,5$ и $q_0 = 0,2$ и $0,5$; $\alpha_0 = 0,7$ при $k_v = 3$ и $q_0 = 0,2$ и $0,5$.

Из результатов расчета следует, что общие величины изменений расхода кокса при изменениях величин кинетических коэффициентов во всем диапазоне возможных значений довольно значительны и составляют относительно среднего: для $\alpha_0 \pm 6\%$; для $k_v \pm 7\%$; для $q_0 \pm 5\%$. Величины изменения расхода кокса (ΔK), производительности ($\Delta П$) и определяющие их степени прямого восстановления (Δr) и температуры колошникового газа (Δt_k), приходящиеся на относительную единицу изменения коэффициента (%), изменяются нелинейно. Для АЭ коэффициента теплопередачи в столбе шихты они составляют:

α_0 , знач. (+%)	0,4 (+0%)	0,5 (+25)	0,6 (+20)	0,7 (+16,7)
Δr , %/%		+0,0	+0,0	+0,1
Δt_k , град./%		-0,3	-3,4	-7,2
ΔK , кг/%		-0,0	-0,7	-1,8
ΔK , %/%		-0,0	-0,14	-0,37
$\Delta П$, %/%		+0,0	+0,22	+0,42

Сокращение расхода кокса и прирост производительности определяются величиной уменьшения температуры колошникового газа, обусловленного ростом скорости теплопередачи.

Увеличение скорости теплопередачи в столбе шихты при переходе от варианта $\alpha_0 = 0,4$ к варианту $\alpha_0 = 0,6$ приводит к перемещению изотерм газа вниз с уменьшением разности температур газа и шихты во всех РКЗ. При этом уменьшается высота нижних и увеличивается высота верхних зон теплообмена с постепенным вырождением верхней ступени теплообмена. Уменьшение расстояний между изотермами при смещении их вниз привело к сокращению толщины зоны размягчения и плавления (ЗРП).

Для АЭ коэффициента скорости восстановления железа величины экономии кокса, прироста производительности и изменения степени прямого восстановления и температуры колошникового газа составляют:

k_v , знач. (+%)	0,5 (+0%)	1,0 (+100%)	2,0 (+100%)	3,0 (+50%)
Δr , %/%		-0,065	-0,036	-0,06
Δt_k , град./%		+0,39	-0,57	-0,08
ΔK , кг/%		-0,194	-0,4	-0,35
ΔK , %/%		-0,04	-0,08	-0,07
$\Delta П$, %/%		+0,015	+0,07	+0,05

Сокращение расхода кокса и прирост производительности определяются изменением величины степени косвенного восстановления при некотором изменении температуры колошникового газа.

Теплотехнический и физико-химический механизм указанного явления следующий. Увеличение скорости косвенного восстановления и соответствующее уменьшение объема прямого при увеличении коэффициента k_v приводит к увеличению разности температур газа и шихты у периферии (РКЗ-10) в области протекания прямого восстановления (900–1100 °С). При этом в промежуточных РКЗ-2-9 граница верхней и нижней зон теплообмена с минимальной по высоте печи разностью температур газа и шихты смещается вниз, уменьшая высоту нижней и увеличивая высоту верхней зон теплообмена. Граница начала размягчения ЗРП в РКЗ-2-9 смещается вниз за счет увеличения температур начала размягчения при сокращении прямого восстановления и соответственно содержания FeO в первичных шлаках. В РКЗ-1 и 10 эта граница смещается вверх вследствие перетока газов по высоте из РКЗ-2-9 к периферии и центру. Поскольку нижняя граница ЗРП, как и все высокотемпературные изотермы, сместилась вниз, толщина ЗРП несколько увеличилась во всех РКЗ.

Для АЭ коэффициента теплосъема со стен печи величины экономии кокса, прироста производительности, изменения температуры колошникового газа, степени прямого восстановления и теплопотерь ($\Delta Q_{\text{пот}}$) составляют:

q_o , знач. (+%)	0,20 (+0)	0,30 (+50%)	0,40 (+33,3%)	0,50 (+25%)
Δr , %/%		–	–	+ 0,16
Δt_k , град./%		+ 1,6	– 0,45	– 2,08
$\Delta Q_{\text{пот}}$, (кДж/кг)/%		+ 2,4	+ 3,3	+ 4,0
ΔK , кг/%		+ 0,661	+ 0,12	+ 0,52
ΔK , %/%		+ 0,132	+ 0,025	+ 0,11
$\Delta П$, %/%		– 0,126	– 0,025	– 0,04

Сокращение расхода кокса и прирост производительности определяются главным образом изменением величины теплосъема со стен, которая в кДж/кг чугуна увеличивается почти линейно с увеличением q_o , а в расчете на 1 % роста q_o – возрастает ускоренно. Кроме указанной величины на формирование величины расхода кокса влияет температура колошникового газа, изменения которой определяются изменениями характера теплообменных процессов по высоте радиальных зон.

Увеличение теплосъема со стен приводит к перемещению периферийных изотерм газов (РКЗ-10) вниз с увеличением разности температур газов и материалов в РКЗ-10. Изотермы других РКЗ смещаются вверх с увеличением разности температур газов и материалов. При этом граница верхней и нижней зон с минимальной по высоте разностью температур газов и материалов перемещается вверх, увеличивая высоту нижней и сокращая высоту верхней зон теплообмена. Указанная перестройка температурного поля сопровождается перетоком газа по высоте столба шихты в сторону периферии. Из данных расчета следует, что при росте теплосъема у стен доля газа, проходящего в РКЗ-10, увеличивается. Под влиянием этих процессов температура колошникового газа повышается, увеличивая количество кокса, необходимого для покрытия теплового дефицита периферийной зоны.

Таким образом, технологическая потребность кокса на покрытие тепловых потерь печи превышает балансовую на величину, определяемую перестройкой температурного и газодинамического полей печи. Особенности перестройки и возможности оптимизации полей подлежат дальнейшему изучению.

В соответствии с указанной деформацией температурного поля печи с ростом теплосъема у стен ЗРП в РКЗ-10 несколько утолщается без смещения верхней границы по высоте, а в РКЗ-1-9 смещается вверх без изменения толщины.

Представляют интерес варианты технологии при граничных значениях кинетических коэффициентов:

– минимальных $\alpha_o = 0,4$ и $k_v = 0,5$ при максимальном $q_o = 0,5$ (МиниМакс) и при минимальном $q_o = 0,2$ (МиниМин);

– максимальных $\alpha_o = 0,7$ и $k_v = 3,0$ при минимальном $q_o = 0,2$ (МаксиМин) и при максимальном $q_o = 0,5$ (МаксиМакс).

Из 4 рассчитанных вариантов три дают результаты, соответствующие устойчивой технологии, но имеющие отличия от вариантов при промежуточных значениях кинетических коэффициентов. Результаты МиниМакс не отвечают условиям устойчивой технологии и могут быть преобразованы путем сужения граничных значений коэффициентов α_o , k_v и q_o или работы с заведомо завышенным расходом кокса (для запаса устойчивости). Из результатов расчета следует:

1. Минимальный расход кокса в диапазоне варьирования кинетических коэффициентов достигнут при максимальной скорости процессов и минимальном теплосъеме со стен (МаксиМин) и составил 420 кг/т чугуна, что, по меньшей мере, на 27 % ниже, чем в случае минимальной скорости процессов при максимальном теплосъеме со стен (МиниМакс) – 574 кг/т. Различие обусловлено меньшими температурой колошникового газа (79 °С против 255 °С), степенью прямого восстановления (24,9 против 37,7 %) и потерями теплоты (326 против 796 кДж/кг).

Сокращение потерь теплоты при уменьшении коэффициента q_o от 0,5 до 0,2 составило в вариантах МаксиМин и МиниМакс соответственно 287 и 402 кДж/кг чугуна, или 47 и 50 % от исходных величин.

2. Ускорение процессов тепломассообмена в столбе шихты при минимальных тепловых потерях через стены проявляется в виде комплексного взаимодействия неаддитивных первичных факторов и приводит к существенной реформации температурного поля путем сдвига всех высокотемпературных изотерм (>900 °С) в РКЗ-2-9 вверх на 5–7 м, а низкотемпературных – на 1–3 м. Величина сдвига в том же направлении в РКЗ-1 вдвое меньше. В РКЗ-10 изотермы сдвинулись вниз. При этом разность температур газа и шихты в РКЗ с пониженной рудной нагрузкой (РКЗ-1, 2, 6) и в РКЗ-10 уменьшилась вплоть до вырождения верхней ступени теплообмена в некоторых из них. В РКЗ с повышенной рудной нагрузкой разность температур газа и шихты несколько увеличилась. В РКЗ-1-9 горизонт с наименьшей по высоте разностью температур газа и шихты сместился вверх, увеличив высоту нижней и уменьшив высоту верхней зон теплообмена. В РКЗ-10 указанный горизонт сместился вниз. Степень прямого восстановления железа сократилась в РКЗ-1-9 от 33÷36 % до 10÷22 % и увеличилась в РКЗ-10 от 18 до 23 % при сокращении в целом по печи от 32,1 до 24,9 %.

Заключение. Решение задачи определения кинетических характеристик шихты по результатам текущей эксплуатации доменной печи реализовано с помощью разработанной в

Институте черной металлургии НАН Украины многозонной математической модели процессов доменной плавки, включающей минимальное количество одновременно настраиваемых коэффициентов.

В ходе аналитического исследования влияния величин кинетических коэффициентов на показатели и процессы плавки установлено, в частности, что общее изменение расхода кокса под влиянием изменений каждого из них во всем диапазоне его реальных значений составляет $\pm (5\div 7)$ % от среднего, и уточнен характер и тепло-физико-химический механизм перемещения температурно-концентрационных полей. Установлено, что:

- увеличение скорости теплопередачи в столбе шихты приводит к перемещению изотерм газа вниз с уменьшением разности температур газа и шихты во всех РКЗ при сокращении высоты нижних и увеличении высоты верхних зон теплообмена с постепенным вырождением верхней ступени теплообмена в ряде РКЗ;

- увеличение скорости косвенного восстановления приводит к увеличению разности температур газа и шихты у периферии (РКЗ-10) в области протекания прямого восстановления ($900\text{--}1100$ °С); при этом в РКЗ-2-9 граница верхней и нижней зон теплообмена с минимальной по высоте печи разностью температур газа и шихты смещается вниз, уменьшая высоту нижней и увеличивая высоту верхней зон теплообмена; а в РКЗ-1 и 10 эта граница смещается вверх вследствие перетока газов по высоте из РКЗ-2-9 к периферии и центру;

- увеличение теплосъема со стен приводит к перемещению периферийных изотерм газов (РКЗ-10) вниз, а других РКЗ – вверх с увеличением разности температур газов и материалов во всех РКЗ; причем граница зон теплообмена с минимальной по высоте разностью температур газов и материалов перемещается вверх, увеличивая высоту нижней и сокращая высоту верхней зон, что сопровождается перетоком газа по высоте столба шихты в сторону периферии с повышением температуры колошникового газа и увеличением потребности кокса для покрытия теплового дефицита периферийной зоны; наряду с теплотехнической возникает технологическая потребность кокса для покрытия тепловых потерь.

Минимальный расход кокса в диапазоне варьирования кинетических коэффициентов, достигнутый при максимальной скорости процессов и минимальном теплосъеме со стен, оказался на 27 % ниже, чем в случае минимальной скорости процессов при максимальном теплосъеме со стен.

Ускорение процессов тепломассообмена в столбе шихты при граничных значениях кинетических коэффициентов и минимальных теплотерях через стены приводит к существенной реформации температурного поля путем сдвига в РКЗ-2-9 всех изотерм, а также горизонта с наименьшей по высоте разностью температур газа и шихты вверх с увеличением высоты нижней и уменьшением высоты верхней ступеней теплообмена при сдвиге указанных изотерм и горизонтов в РКЗ-10 в противоположном направлении и сокращении степени прямого восстановления железа в РКЗ-1-9 от $33\div 36$ % до $10\div 22$ %, а в целом по печи от 32,1 до 24,9 %.

Список использованных источников

1. Товаровский И. Г., Райх Е. И., Шкодин К. К., Улахович В. А. Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом. – М.: Metallurgia, 1978. – 204 с.
2. Шкодин К. К., Манчинский В. Г. Кинетика восстановления оксидов железа в доменной плавке и возможности ее математического описания // Познание процессов доменной плавки. Коллективный труд под ред. В. И. Большакова и И. Г. Товаровского. Днепропетровск: Пороги, 2006. – С. 167–187.
3. Товаровский И. Г., Большаков В. И., Меркулов А. Е. Аналитическое исследование процессов доменной плавки: монография. – Днепропетровск: Экономика, 2011. – 206 с.

УДК 669.014

Е. В. Торопов*, **Л. Е. Лымбина***, **Д. К. Волкинд****

* ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, Россия

**ГК «ПЛМ-УРАЛ» – «Делкам-Урал», г. Екатеринбург, Россия

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОГНЕУПОРНОГО МАТЕРИАЛА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА В РЕГЕНЕРАТИВНОЙ НАСАДКЕ

Аннотация

В работе рассмотрено влияние свойств материала насадки высокотемпературных регенераторов на коэффициент теплообмена в каналах различного диаметра. Структурно задача решена относительно коэффициента теплообмена идеального регенератора и степени использования поверхности теплообмена для трех типов материала насадки: шамота, диоксида кремния и корунда при варьировании диаметра канала в насадочной матрице в интервале от 0,03 до 0,05 м и изменении расхода дутья от $3 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^3$ м³ в минуту. Результаты рассмотрены в условиях модельного примера при относительном живом сечении насадки 0,335 и числе аппаратов в системе от 2 до 4. Получены зависимости для коэффициентов теплообмена в функции теплофизических свойств насадочного материала.

Ключевые слова: регенератор, теплообмен, эффективность, канал насадки, конвекция, излучение.

Abstract

In this work the influence of the properties of the material of a setting of the high-temperature regenerators on the coefficient of heat transfer in channels of different diameter. The structural problem is resolved relative to the heat transfer coefficient ideal regenerator and extent of use of heat-exchange surface for three types of material setting: fire clay, silica and corundum at a variation of a channel diameter in the setting matrix in the range from 0.03 to 0.05 m and expenditure