

Расчетная оценка процессов и режимов доменной плавки при различном содержании в шихте сырого известняка*

Многозонная математическая модель доменной плавки позволяет выявить внутренние связи процессов в объеме доменной печи (ДП), влияющие на характер режимов плавки и конечные результаты. Для условий ДП-5 ОАО «Северсталь» и ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» выполнено аналитическое исследование показателей и процессов плавки при изменении содержания сырого известняка в шихте с варьированием распределения материалов по радиусу печи.

Ключевые слова: доменная плавка, известняк, распределение температур

Цель и постановка задачи

Задачей настоящей работы является оценка содержания сырого известняка в шихте разной степени офлюсования с позиций системного подхода влияния на показатели плавки. Известные оценки на основе эмпирических данных и балансовых расчетов [1, 2] дают главным образом исходных параметров и конечных результатов (расход кокса, производительность) с использованием лишь отдельных промежуточных параметров без раскрытия всей полноты внутренних связей, влияющих на характер режимов плавки и конечные результаты.

Для системной оценки влияния содержания сырого известняка в шихте на показатели плавки в настоящей работе используется разработанная в Институте черной металлургии (ИЧМ) НАН Украины математическая модель [3], отличающаяся тем, что на основе структурной увязки многозонных по высоте и радиусу доменной печи, 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.

Особенности модели и методики исследования

Протекание процессов теплопередачи и восстановления железа в кольцевых зонах по высоте столба шихты описывается в модели дискретно-системной материально-тепловых балансов в 12 зонах по вертикали с интервалами температур шихты от начальной до 400 °С и далее через каждые 100 °С вплоть до температуры продуктов плавки. Каждая из вертикальных зон характерна своей спецификой протекания процессов тепло- и массопередачи, а также перехода материалов от твердой фазы к жидкой через тестообразное состояние. В периферийной кольцевой зоне по всей высоте столба шихты учитывается потеря теплоты через стенки печи. Равновеликим по горизонтальной площади колошника кольцевым зонам соответствуют 10 угловых поло-

жений лотка бесконусного загрузочного устройства. Загрузки этих зон отличаются друг от друга соотношением компонентов шихты (в первую очередь кокса и железорудной части), задаваемым программой загрузки и вычисляемым в модели загрузки, где предусматривается задание распределения на колошнике каждого отдельного компонента. Это обуславливает разный состав шихты и соответственно различный состав формируемых шлаков в разных радиальных кольцевых зонах (РКЗ). В соответствии с этим температурные границы начала размягчения, плавления и полного ожигения определяются для каждой РКЗ. Их зависимость от химического состава шихты рассчитывали по разработанной в ИЧМ обобщенной модели, являющейся одним из модулей общей многозонной модели доменной плавки, основанной на прогнозировании этих температур при помощи интегральных критериев «свертки» химического состава с учетом межзонального взаимодействия компонентов шлаковой связки с последующей корректировкой указанных температур по степени восстановления материалов и количеству вносимых и циркулирующих в печи щелочных оксидов ($K_2O + Na_2O$).

Таким образом, весь объем столба шихты разбит на 120 (10 × 12) условных ячеек, для каждой из которых выполняется расчет зонального материально-теплового баланса, увязанного с общим материально-тепловым балансом печи.

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 теплотеря); учет перетоков газа на разных горизонтах из одних РКЗ в другие; оценку развития восстановительного процесса, в частности степени прямого восстановления, в кольцевых сечениях по радиусу печи; установление влияния распределения материалов по радиусу

* Работа выполнена под руководством д-ра техн. наук, проф. И. Г. Товаровского

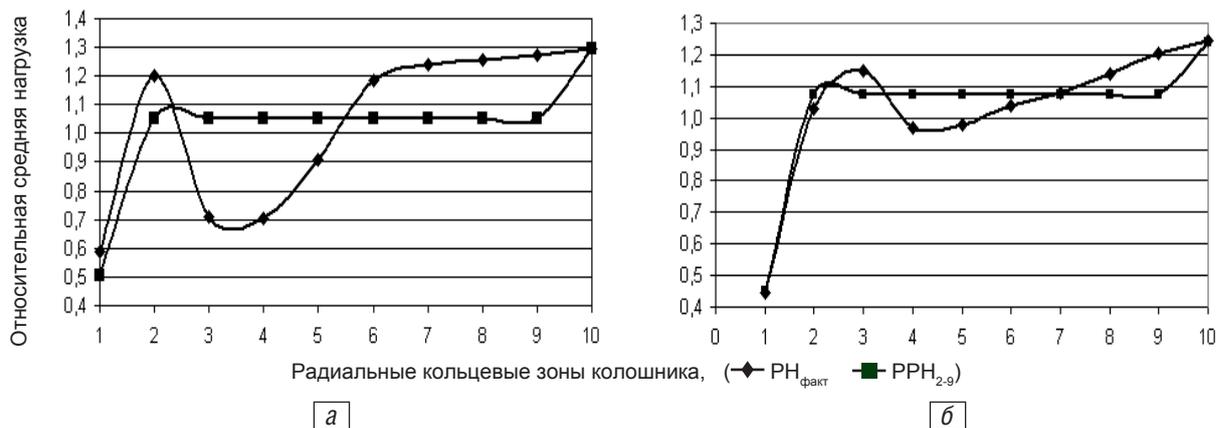


Рис. 1. Распределение относительных рудных нагрузок по РКЗ колошника ДП-9 и ДП-5 при фактических условиях ($PH_{факт}$) и при переходе к равномерному распределению в РКЗ 2-9 (PPH_{2-9}): ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» (а); ДП-5 ОАО «Северсталь» (б)

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 содержания железа в шихте на показатели процессов доменной плавки использовали данные о работе доменных печей № 9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» 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 наибольшие погрешности по результатам анализа. Далее, задавая различные содержания сырого известняка в шихте (с соответствующей корректировкой остальных компонентов), выполнили расчетные прогнозы показателей процессов плавки для двух вариантов распределения относительных рудных нагрузок на колошнике (рис. 1).

Анализ результатов

Используемая методика расчетов предусматривает пересчет состава одного из агломератов по условиям получения заданного расхода известняка. С этой целью после определения расхода известняка при заданных расходах кокса и дутьевых добавок определяют его отклонение от заданного ($\Delta И$), после чего новый состав агломерата считают как средневзвешенный для суммы расхода агломерата и $\Delta И$.

Температура газов $T, ^\circ C$

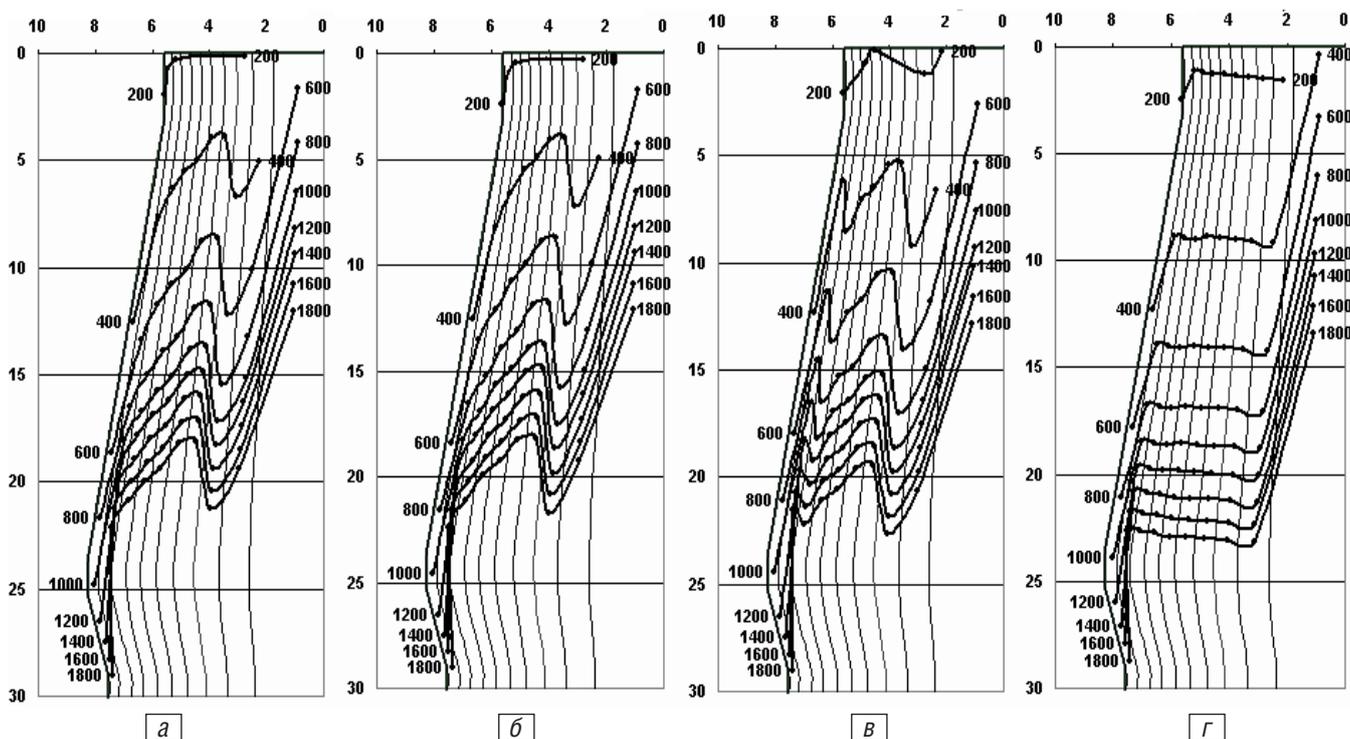


Рис. 2. Распределение температур в объеме печи при различном содержании известняка в шихте для условий ДП-5 ОАО «Северсталь»: изв = 0 кг/т, $PH_{факт}$ (а); изв = 100 кг/т, $PH_{факт}$ (б); изв = 200 кг/т, $PH_{факт}$ (в); изв = 200 кг/т, PPH_{2-9} (г)

В табл. 1 и 2 приведены результаты расчетов показателей плавки по модели для ДП-5 ОАО «Северсталь» и ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» соответственно. По этим данным установлено, что при выводе из шихты каждых 10 кг/т чугуна сырого известняка за счет увеличения степени офлюсования агломератов и окатышей экономия кокса и прирост производительности составляют 0,5-0,6 %. При колебаниях температуры колошникового газа $\pm(1\div 2)$ °С и степени прямого восстановления $\pm(0,1\div 0,2)$ % их влияние на расход кокса незначительно, так что эффект оценивается сокращением затрат теплоты на разложение карбонатов и взаимодействие выделенного диоксида углерода с твердым углеродом кокса (степень взаимодействия принята 50 %).

На рис. 2-5 приведены результаты расчетов параметров процессов плавки для двух рассматриваемых печей при наличии в составе шихт сырого известняка 0, 100 и 200 кг/т чугуна.

Изменение температурного поля при увеличении содержания сырого известняка в шихте происходит в обеих печах в направлении снижения температур в шахте и уменьшения разности температур между газом и шихтой (рис. 2, 4). Анализ численных значений показал, что на ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» средняя для 10 РКЗ величина разности температур между газом и шихтой уменьшилась при увеличении расхода сырого известняка от 0 до 200 кг/т в ВТЗ 1-6 со 120 до 70 °С, а в ВТЗ 7-9 – с 477 до 450 °С. Соответствующие величины на ДП-5 ОАО «Северсталь» составили 95-61 и 370-360 °С.

Таблица 1

Показатели доменной плавки для условий ДП-5 при изменении содержания известняка в шихте и при переходе к равномерному распределению $Pn_{отн}$ по РКЗ

Показатели	$Pn_{факт}$			$PPn_{2,9}$		
	0	100	200	0	100	200
Расход известняка, кг/т	0	100	200	0	100	200
Удельная производительность, (т/м³)/сут	1,756	1,647	1,573	1,839	1,723	1,610
Расход твердого топлива, кг/т	422	451	471	406	433	461
Дутье: расход, м³/мин	7848	7795	7763	7854	7791	7756
– температура, °С	1184	1184	1184	1184	1184	1184
– кислород, %	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3
Расход технического кислорода, м³/т	57,53	60,90	63,50	54,98	58,19	62,01
Расход природного газа, м³/т	106	106	106	106	106	106
– то же, % к дутью	9,06	8,56	8,21	9,48	8,95	8,40
Температура колошникового газа, °С	260	265	251	198	207	222
Содержание, % CO	21,31	22,48	22,97	20,80	21,87	22,66
– CO ₂	19,70	19,45	19,67	20,33	20,16	20,05
– H ₂	6,91	6,75	6,53	6,98	6,81	6,57
Всего (A + O + P)	1587	1530	1473	1587	1530	1473
Железо в шихте, %	59,64	59,57	59,51	59,68	59,61	59,53
Железо в (A + O + P), %	59,75	61,90	64,15	59,75	61,90	64,15
Рудная нагрузка, т/т	3,77	3,63	3,57	3,91	3,78	3,64
Вынос пыли общий, кг/т	24,35	25,37	26,20	24,01	24,99	25,99
Кол-во шлака, кг/т	270	272	272	269	271	272
Теоретическая температура горения, °С	2001	2027	2045	1980	2006	2035
Кол-во фурменного газа, м³/т	1695	1782	1849	1629	1712	1810
Кол-во сухого колошникового газа, м³/т	1706	1832	1929	1637	1757	1888
Прямое восстановление оксида Fe, %	26,20	25,96	24,18	26,27	25,59	23,97
Степень использования газов, % CO:	48,03	46,38	46,13	49,43	47,97	46,94
– H ₂	48,04	45,68	44,81	49,44	47,27	45,62
– общая	48,03	46,22	45,84	49,43	47,80	46,65
Общий расход углерода, кг/т	363,4	387,8	404,9	349,6	372,2	396,4
Сжигаемый у фурм из кокса	253,4	271,7	285,8	239,6	257,0	277,7
На прямое восстановление Fe	52,81	52,32	48,70	52,95	51,59	48,27
Общий приход тепла, кДж/кг	4465	4757	4983	4245	4524	4855
– в том числе горение кокса	2486	2665	2803	2350	2521	2724
– тепло дутья и добавок	1921	2031	2116	1838	1943	2067
Потребность тепла, кДж/кг	3180	3430	3632	3175	3414	3624
– в том числе восстановление Fe и л/в элементов	656	672	620	658	662	615
– разложение карбонатов	0	208	409	0	204	408
Теплосодержание колошникового газа	771	843	844	561	631	731
Остаточное тепло (потери)	514	483	507	509	480	501
Отношение водяных чисел	0,78	0,77	0,77	0,79	0,78	0,77
Теплост. колошникового газа, кДж/м³	3443	3574	3613	3387	3504	3577

Показатели доменной плавки для условий ДП-9 при изменении содержания известняка в шихте и при переходе к равномерному распределению $PH_{отн}$ по РКЗ

Показатели	$PH_{факт}$			PPH_{2-9}		
	0	100	200	0	100	200
Расход известняка, кг/т	0	100	200	0	100	200
Удельная производительность, (т/м ³)/сут	1,772	1,686	1,587	1,836	1,760	1,604
Расход твердого топлива, кг/т	494	517	549	476	496	543
Дутье: расход, м ³ /мин	6708	6644	6596	6702	6649	6598
– температура, °С	1042	1042	1042	1042	1042	1042
– кислород, %	29,74	29,74	29,74	29,74	29,74	29,74
Расход технического кислорода, м ³ /т	141,9	147,8	155,8	136,9	141,7	154,3
Расход природного газа, м ³ /т	80,8	80,8	80,8	80,8	80,8	80,8
– то же, % к дутью	7,46	7,16	6,8	7,74	7,48	6,86
Температура колошникового газа, °С	237	228	222	212	182	212
Содержание, % CO	27,72	28,53	29,75	26,80	27,65	29,44
– CO ₂	19,91	19,92	19,50	20,79	20,82	19,78
– H ₂	6,16	5,98	5,82	6,17	6,02	5,82
Всего (А + О + Р)	1653	1597	1542	1653	1598	1542
Железо в шихте, %	55,20	55,12	55,03	55,23	55,15	55,04
Железо в (А + О + Р), %	55,22	57,24	59,42	55,22	57,24	59,42
Рудная нагрузка, т/т	3,58	3,50	3,38	3,71	3,65	3,41
Вынос пыли общий, кг/т	62,8	64,6	66,5	62,4	64,1	66,4
Кол-во шлака, кг/т	409	410	411	409	409	411
Теоретическая температура горения, °С	2222	2237	2256	2208	2221	2253
Кол-во фурменного газа, м ³ /т	1590	1648	1729	1539	1587	1713
Кол-во сухого колошникового газа, м ³ /т	1651	1743	1863	1591	1673	1844
Прямое восстановление оксида Fe, %	31,06	30,07	30,38	29,61	28,91	29,71
Степень использования газов, % CO:	41,80	41,12	39,59	43,68	42,95	40,19
– H ₂	41,80	40,53	38,46	43,70	42,37	39,06
– общая	41,80	41,02	39,41	43,69	42,85	40,01
Расход углерода, кг/т, общий	420,2	439,7	467,2	404,7	422,2	461,9
Сжигаемый у фурм из кокса	306,4	320,8	340,7	293,8	305,7	336,8
На прямое восстановление Fe	59,60	57,82	58,54	56,82	55,58	57,24
Общий приход тепла, кДж/кг	4662	4869	5153	4485	4655	5098
– в том числе горение кокса	3006	3147	3342	2882	2998	3304
– тепло дутья и добавок	1544	1606	1691	1490	1541	1675
Потребность тепла, кДж/кг	3598	3825	4086	3558	3790	4067
– в том числе восстановление Fe и л/в элементов	783	767	781	749	740	765
– разложение карбонатов	0	203	410	0	200	408
Теплосодержание колошникового газа	691	705	731	598	540	692
Остаточное тепло (потери)	373	339	336	330	325	338
Отношение водяных чисел	0,83	0,83	0,82	0,85	0,85	0,82
Теплотв. колошникового газа, кДж/м ³	4174	4256	4393	4058	4150	4354

В этой печи в большинстве РКЗ в области 700-900 °С наблюдается уменьшение разности температур газа и шихты до близких к нулю значений.

Вариант равномерного распределения рудных нагрузок (PPH_{2-9}) в обеих печах приводит к лучшему использованию теплоты газового потока, следствием которого является снижение температуры колошникового газа (табл. 1, 2), а также к увеличению равномерности распределения температур в поперечном сечении доменной печи, следствием которого является увеличение количества РКЗ в области 700-900 °С с разностью температур между шихтой и газом близкой нулю.

Зона размягчения и плавления (ЗРП) при фак-

тическом распределении рудной нагрузки ($PH_{факт}$) в условиях ДП-5 ОАО «Северсталь» при увеличении расхода известняка до 100 кг/т (рис. 3) изменилась незначительно, а при увеличении расхода известняка до 200 кг/т – существенно: толщина на периферии увеличилась в 2 раза (до 3,6 м), температура начала размягчения и плавления уменьшилась по сравнению с базовым вариантом на 25-40 °С.

На ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» с увеличением расхода известняка произошло смещение ЗРП в область распара на периферии и небольшое смещение вниз в оси (рис. 5). При этом толщина ЗРП увеличилась на 0,4-1,2 м, а температура начала размягчения и плавления уменьшилась на 15-25 °С.

Температура газов T , °C

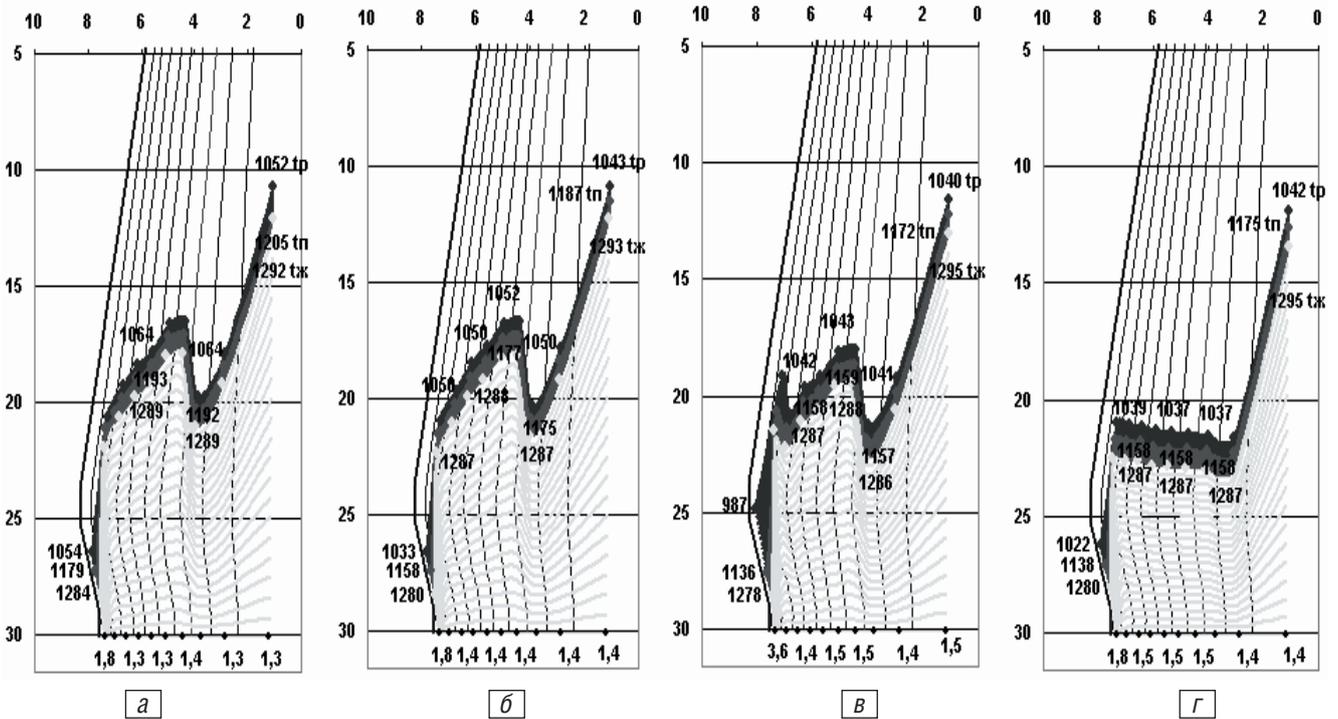


Рис. 3. Положение зоны размягчения и плавления материалов в объеме печи при различном содержании известняка в шихте для условий ДП-5 ОАО «Северсталь»: изв = 0 кг/т, $PH_{факт}$ (а); изв = 100 кг/т, $PH_{факт}$ (б); изв = 200 кг/т, $PH_{факт}$ (в); изв = 200 кг/т, PRH_{2-9} (г).
Примечание: t_1 , t_2 , t_3 – температуры начала размягчения, плавления и ожигения; по горизонтали – расстояние от оси печи, по вертикали – от верха печи, м

Переход к равномерному распределению материалов на колошнике (PRH_{2-9}) с увеличением расхода известняка в шихте в обеих печах приводит к дополнительному смещению вниз и выравниванию ЗРП в РКЗ-2-9, что способствует увеличению твердофазной области и экономии топлива.

Выводы

Расчетно-аналитическое исследование процессов доменной плавки при разном количестве сырого известняка в шихте с помощью математической модели позволило, наряду с количественным уточнением связей исходных параметров и конечных

Температура газов T , °C

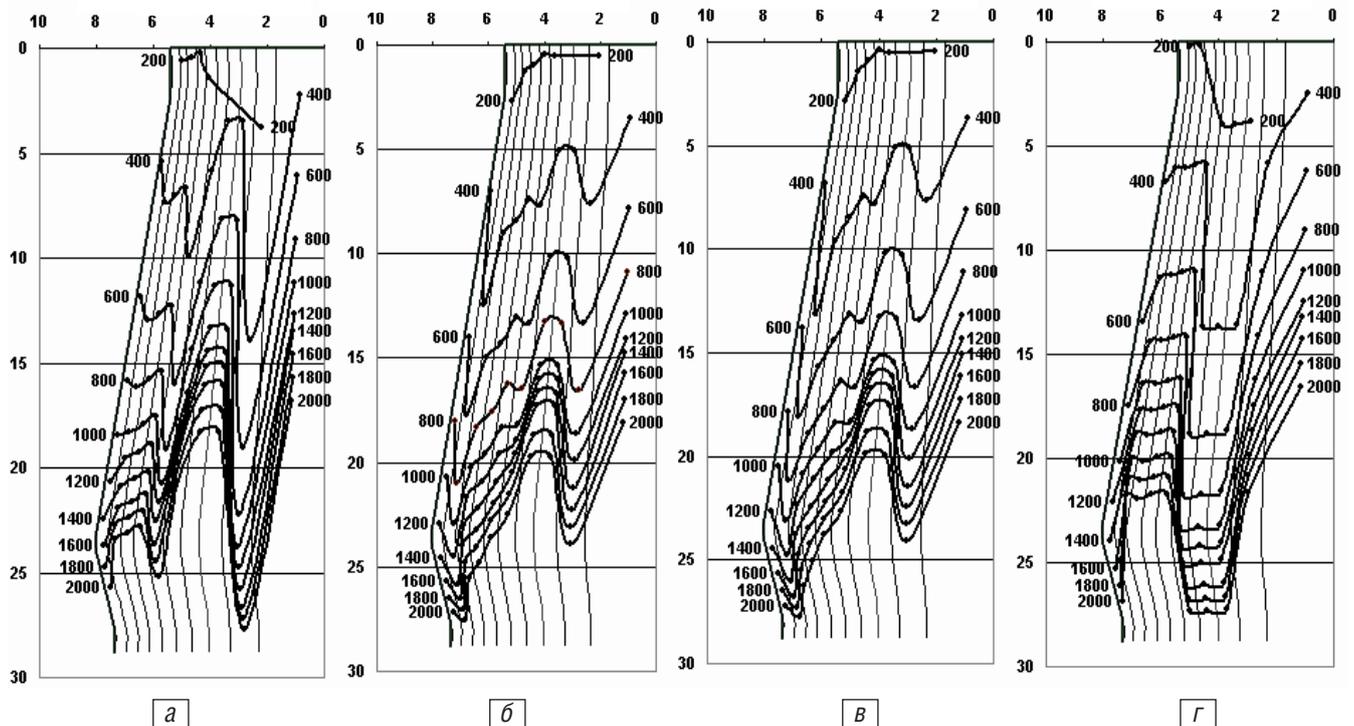


Рис. 4. Распределение температур в объеме печи при различном содержании известняка в шихте и распределении материалов на колошнике для условий ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»: изв = 0 кг/т, $PH_{факт}$ (а); изв = 100 кг/т, $PH_{факт}$ (б); изв = 200 кг/т, $PH_{факт}$ (в); изв = 200 кг/т, PRH_{2-9} (г)

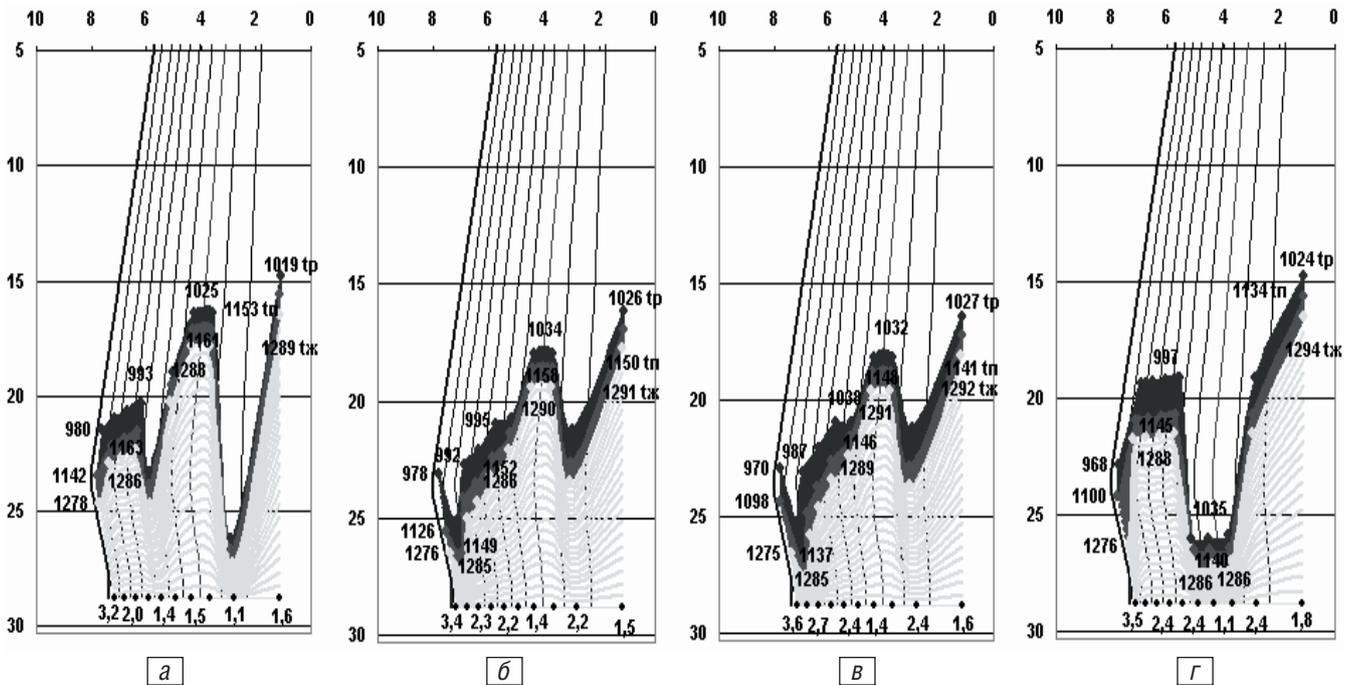


Рис. 5. Положение зоны размягчения и плавления материалов в объеме печи при различном содержании известняка в шихте для условий ДП-9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог»: изв = 0 кг/т, $RH_{\text{факт}}$ (а); изв = 100 кг/т, $RH_{\text{факт}}$ (б); изв = 200 кг/т, $RH_{\text{факт}}$ (в); изв = 200 кг/т, $RH_{\text{факт}}$ (г).

Примечание: t_p , t_n , $t_ж$ – температуры начала размягчения, плавления и охлаждения; по горизонтали – расстояние от оси печи, по вертикали – от верха печи, м

результатов (расход кокса, производительность), раскрыть внутренние связи процессов в объеме печи, влияющие на характер режимов плавки и конечные результаты.

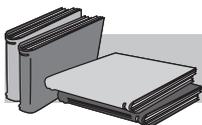
Установлено, что с увеличением количества сырого известняка в шихте происходит уменьшение разности температур газа и шихты, особенно в области температур шихты 700-900 °C, а также смещение изотерм в низ печи. Зона размягчения и плавления также смещается в низ печи с увеличением толщины отдельных ее элементов.

Влияние указанных процессов на конечный рас-

ход топлива в результате незначительно, так что экономия от вывода сырого известняка за счет офлюсования агломерата и окатышей определяется главным образом основным балансовым фактором – экономией теплоты диссоциации карбонатов кальция и магния и взаимодействия части углекислого газа, выделяющегося из карбоната кальция, с углеродом кокса.

При выводе из шихты каждых 10 кг/т чугуна сырого известняка экономия кокса составляет 0,5-0,6 %.

Изложенные закономерности необходимо использовать при системном формировании рациональных режимов плавки.



ЛИТЕРАТУРА

1. Рамм А. Н. Современный доменный процесс. – М.: Metallurgy, 1980. – 304 с.
2. Товаровский И. Г. Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса. – М.: Metallurgy, 1987. – 192 с.
3. Товаровский И. Г. Доменная плавка. Монография. Изд. 2-е. – Днепропетровск: Пороги, 2009. – 768 с.

Анотація

Меркулов О. Є.

Розрахункова оцінка процесів та режимів доменної плавки при різному вмісті в шихті сирого вапняку

Багатозонна математична модель доменної плавки дозволяє виявити внутрішні зв'язки процесів в об'ємі доменної печі (ДП), які впливають на характер режимів плавки та кінцеві результати. Для умов ДП-5 ВАТ «Северсталь» і ДП-9 ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» виконано аналітичне дослідження показників і процесів плавки при зміні вмісту сирого вапняку в шихті з варіюванням розподілу матеріалів по радіусу печі.

Ключові слова

доменна плавка, вапняк, розподіл температур

Summary

Merkulov A.

Process estimation and modes of blast furnace with different concentration of raw limestone in burden

Multizone mathematical model of blast fusion allows to determinate internal process relations in the volume of blast furnace (BF) that impacts on the way of fusion modes and final results. There was made analytical research of indexes and fusion processes while the change of volume of raw limestone in burden with variable dispensation of materials onto fusion radius developed for conditions BF-5 of «Severstal» and BF-9 of «ArselorMittal Krivoj Rog».

Keywords

blast furnace, limestone, temperature dispensation

Поступила 10.09.10

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

В соответствии с требованиями ВАКа все статьи, поступающие в редакции научных журналов, должны обязательно проходить **рецензирование**, иметь **ключевые слова**, **аннотации**, **название статьи**, **фамилию**, **имя**, **отчество авторов на 3-х языках – русском, украинском и английском**.

Объем статьи – не более 10 стр., рисунков – не более 5.

Статьи в редакции должны поступать на бумажном (с подписями всех соавторов) и электронном носителях.

Для текстовых материалов желательно использовать формат **doc**. Для графических материалов – формат **jpeg**. Графики и чертежи должны быть **черно-белыми**, четкими и контрастными. Фотографии и рисунки с разрешением, как минимум, **300 dpi**.

Также необходимо прилагать контактную информацию (e-mail, телефон, адрес, факс) и сведения об авторах.