

И.Г.Товаровский, А.Е.Меркулов, Ф.М.Шутылев, В.В.Лебедь

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОТДУШИН НА ХОД ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ С ПОМОЩЬЮ МНОГОЗОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Целью работы является изучение влияния параметров отдушин на ход доменной печи с использованием математической модели. Показано, что повышение эффективности доменной плавки за счет совершенствования распределения шихтовых материалов в печи следует вести в направлении поиска рационального распределения рудных нагрузок в кольцевых зонах по радиусу колошника, обращая особое внимание на осевую и периферийную зоны.

доменная печь, отдушины, ход плавки, математическая модель, распределение рудных нагрузок, эффективность плавки

Постановка задачи. Структура столба шихты в доменной печи формируется под влиянием параметров загрузки шихты «сверху» и дутьевых параметров «снизу» и зависит также от профиля печи и взаимодействия с ним элементов столба. При этом требования к свойствам структуры столба противоречивы: максимум проницаемости при возможно более равномерном распределении железорудной составляющей для лучшего использования газа. На практике при реальных свойствах шихты приходится определять приоритеты – максимум производительности или минимум расхода топлива. В первом случае большую часть газа направляют через «отдушины», во втором стараются сократить «отдушины» для лучшего использования газа.

Понятие «осевой отдушины» (загрузка к оси только кокса), введенное В.И. Гулыгой [1], стало общепризнанным [2,3], однако его последующее употребление, как и понятия «периферийная отдушина», было не всегда однозначным, что требует содержательных определений, которые предлагаются и используются в настоящей работе:

Отдушины – это целенаправленно образуемые в осевой и периферийных зонах печи кольцевые каналы в столбе шихты с увеличенной газопроницаемостью, обеспечивающие устойчивость схода материалов при заданном распределении рудных нагрузок по радиусу колошника. При этом осевая отдушина формируется в виде специально образуемого при загрузке печи осевого столба кокса (иногда заданного сорта) без примеси железорудной составляющей, входящей составной частью в имеющую определенную (отличную от 0) рудную нагрузку осевую или близжайшие к ней зоны по радиусу колошника, а периферийная отдушина – это кольцевой пристенный канал повышенной газопроницаемости, образующийся за счет увеличенной порозности движущихся материалов вследствие естественного градиента скорости слоев у стен, а также целенаправленно формируемый путем управления рудной нагрузкой и соот-

ношением загружаемых материалов разной газопроницаемости в этой области.

Методика исследования. Исследования выполнены с помощью разработанной в ИЧМ математической модели, предназначенной для количественного анализа процессов доменной плавки в кольцевых сечениях по высоте печи при заданном распределении материалов в равновеликих по площади зонах по радиусу колошника [4, 5]. Протекание процессов теплопередачи и восстановления железа в кольцевых зонах по высоте столба шихты описывается в модели дискретно системой материально–тепловых балансов в 12 зонах по вертикали с интервалами температур шихты от начальной до 400°C и далее через каждые 100°C 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 положений лотка бесконусного загрузочного устройства. Загрузка этих зон отличается друг от друга соотношением компонентов шихты (в первую очередь кокса и железорудной части), задаваемых программой загрузки и вычисляемых в модели загрузки, где предусматривается задание распределения на колошнике каждого отдельного компонента железорудных материалов и кокса. 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 ожижения определяются для каждой РКЗ. Зависимость температур начала размягчения, плавления и полного ожижения от химического состава шихты определяли для каждой РКЗ и 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 межатомного взаимодействия компонентов шлаковой связки с последующей корректировкой указанных температур по степени восстановления материалов и количеству вносимых и циркулирующих в печи щелочных оксидов ($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$). Таким образом, весь объем столба шихты разбит на $10 \times 12 = 120$ условных ячеек, для каждой из которых выполняется расчет зонального материально–теплового баланса, увязанного с общим материально–тепловым балансом печи.

Изложение основных материалов исследования. Для анализа использованы показатели работы ДП–9 ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» в один из характерных периодов её работы. При этом в соответствии с указанной выше методикой фактические показатели скорректированы исходя из обязательной сходимости балансов железа, шлакообразующих и газифицированных элементов. Отвечающее заданным параметрам загрузки шихты распределение рудных нагрузок (РН) в радиальных кольцевых зонах (РКЗ) на колошнике (относительно средней $\text{РН}_{\text{ср}} = 3,35 \text{ т/т}$) было следующим:

№ РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
РН	0,58	1,21	0,70	0,70	0,91	1,20	1,25	1,27	1,29	1,31

Рассмотрены следующие прогнозируемые режимы доменной плавки (табл.1):

– с осевой отдушиной при относительной величине РН в РКЗ–1 0,4 и 0,2 (варианты Ось0,4 и Ось0,2);

– при разном значении пристенного коэффициента (Пр – зависит от многих факторов и устанавливается при адаптации модели к реальному процессу.), являющегося отношением порозности шихты в пристенной РКЗ–10 к порозности шихты того же состава в других РКЗ, а также разной РН (нижний индекс) в РКЗ–10 – варианты База (Пр1,2); Пр1,1,1,31; Пр1,1,1,35; Пр1,05,1,31; Пр1,05,1,35;

– при разном предполагаемом распределении РН в промежуточной зоне (РКЗ–2–9) – равномерном (Равн), равномерно–волнообразном с малой волной (М.В.), равномерно–волнообразном с большой волной (Б.В.), а также специально подобранном рациональном (Рац). Волнообразное изменение рудных нагрузок в РКЗ–2–9 (с малой и большой волной) задается искусственно для теоретической оценки его влияния на показатели плавки.

Соответствующие распределения РН относительно средней РН_{ср} следующие:

№ РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	РН _{ср} , т/т
БАЗА	0,58	1,21	0,70	0,70	0,91	1,20	1,25	1,27	1,29	1,31	3,35
Ось0,4	0,40	1,21	0,80	0,80	0,98	1,20	1,25	1,27	1,29	1,31	3,40
Ось0,2	0,20	1,21	0,95	0,95	1,10	1,20	1,25	1,27	1,29	1,31	3,39
Пр1,1,1,31	0,58	1,21	0,70	0,70	0,91	1,20	1,25	1,27	1,29	1,31	3,40
Пр1,1,1,35	0,58	1,20	0,70	0,70	0,90	1,19	1,24	1,26	1,28	1,35	3,40
Пр1,05,1,31	0,58	1,21	0,70	0,70	0,91	1,20	1,25	1,27	1,29	1,31	3,33
Пр1,05,1,35	0,58	1,20	0,70	0,70	0,90	1,19	1,24	1,26	1,28	1,35	3,35
Равн	0,40	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,08	1,31	3,57
М.В.	0,40	1,07	1,09	1,07	1,09	1,07	1,09	1,07	1,09	1,31	3,52
Б.В.	0,40	1,05	1,11	1,05	1,11	1,05	1,11	1,07	1,11	1,31	3,50
Рац	0,40	1	1	1	1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,31	3,54

При уменьшении РН у оси (РКЗ–1) соответствующее увеличение её для соблюдения общего баланса производили в наименее нагруженных РКЗ–3–5, а при увеличении РН у периферии (РКЗ–10) соответствующее уменьшение выполняли в наиболее нагруженных РКЗ–6–9.

В табл.1 приводятся результаты расчета общих показателей для всех вариантов, а на рис.1–5 иллюстрируются процессы в объёме печи.

Таблица 1. Расчетные показатели доменной плавки при различных параметрах отдушин и промежуточной зоны

ПОКАЗАТЕЛИ и характеристики	БАЗА	Осевые отдуш.		Периферийные отдушины				Промежуточная зона			
		Ось0,4	Ось0,2	Пр1,1	Пр1,1	Пр1,05	Пр1,05	Равн	М. В.	Б. В.	Рац
Пристенный коэф-т	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,05	1,05	1,2	1,2	1,2	1,2
РН относительно Rcp: у оси у стен	0,58	0,40	0,20	0,58	0,58	0,58	0,58	0,40	0,40	0,40	0,40
	1,31	1,31	1,31	1,31	1,35	1,31	1,35	1,31	1,31	1,31	1,31
Удельн. произ-сть, т/м ³ сут	1,679	1,714	1,722	1,707	1,706	1,664	1,677	1,814	1,787	1,772	1,791
Расход кусков. топл., кг/т	527,7	520,6	520,9	520,6	520,4	532,0	528,0	494,8	501,8	505,3	499,4
в том числе кокса	476,6	470,1	470,3	470,1	469,9	480,4	476,8	446,8	453,1	456,3	450,9
Тем-ра колошн-го газа, °С	222	190	177	203	205	235	227	128	140	151	146
Содержание в газе, %: CO	28,10	28,02	28,24	27,88	27,85	28,32	28,15	26,97	27,27	27,39	27,07
	CO ₂	20,32	20,50	20,38	20,58	20,60	20,11	20,28	21,63	21,31	21,17
H ₂	5,82	5,88	5,92	5,85	5,85	5,83	5,83	5,93	5,92	5,91	5,91
Расход сыр. известн., кг/т	44	44	44	44	44	45	45	42	42	43	42
Железо в шихте, %	55,13	55,14	55,14	55,14	55,14	55,13	55,13	55,18	55,17	55,17	55,17
Количество шлака, кг/т	410,6	410,4	410,4	410,4	410,4	410,8	410,7	409,4	409,7	409,8	409,6
Теор. тем-ра горения, °С	2241	2234	2233	2235	2235	2244	2241	2213	2219	2222	2218
Кол-во сух. кол. газа, м ³ /т	1756	1728	1726	1730	1730	1770	1756	1640	1663	1676	1657
Прямое восст. Fe, %	32,72	33,24	34,11	32,69	32,58	33,12	32,91	32,17	32,51	32,55	32,01
Степень использ. CO+H ₂ , %	41,92	42,22	41,87	42,42	42,47	41,49	41,83	44,47	43,82	43,55	44,19
Приход теплоты, кДж/кг	4814	4713	4692	4729	4730	4853	4812	4437	4510	4551	4495
Потребн-ть в теплоте, кДж/кг	3875	3884	3906	3871	3869	3887	3880	3845	3857	3860	3845
Теплосодержание кол. газа	687	579	537	621	627	734	704	370	410	446	425
Остаточн. теплота (потери)	252	250	249	237	235	233	228	222	243	244	226
Отношение водяных чисел	0,817	0,824	0,824	0,823	0,823	0,814	0,817	0,844	0,839	0,836	0,840

Для всех вариантов: $T_{\text{дуть}}=1042^{\circ}\text{C}$; $\text{ПГ}=80,8 \text{ м}^3/\text{т}$; $\text{O}_2=29,74\%$.

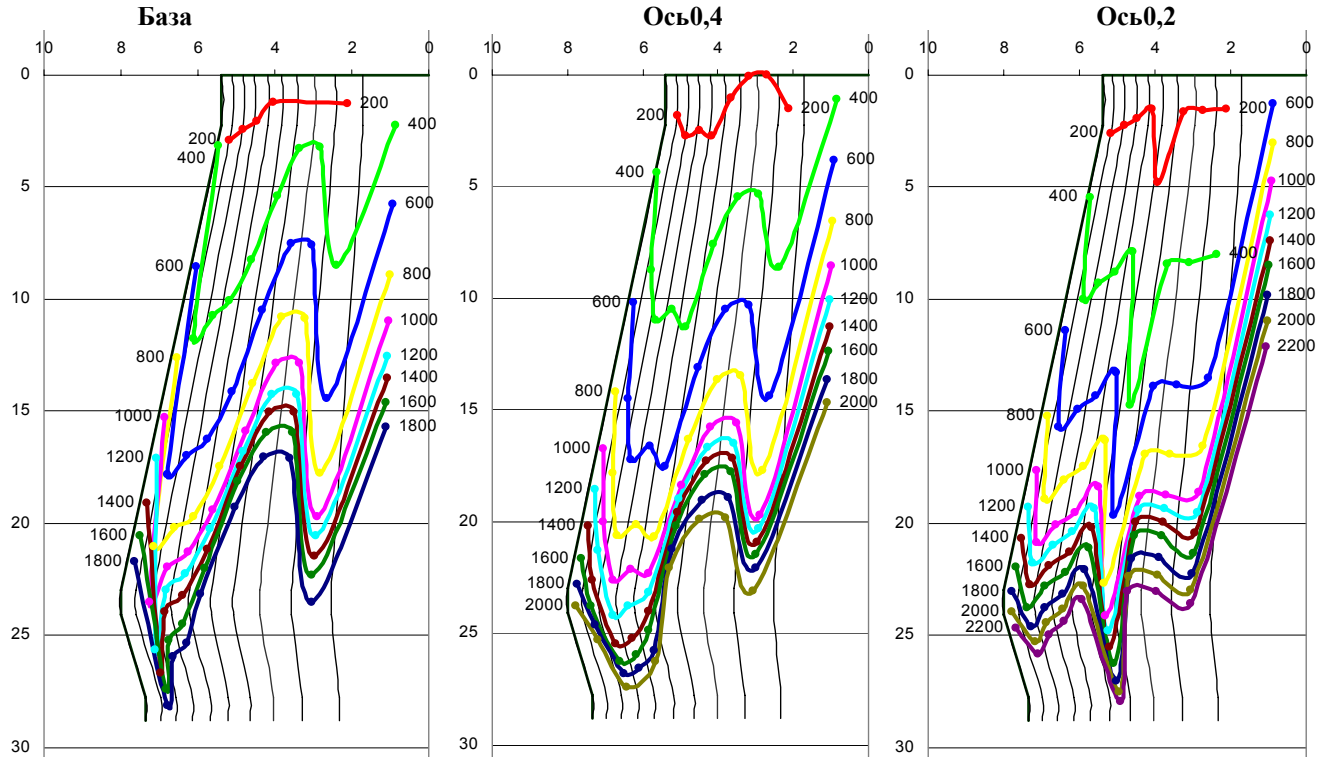


Рис.1. Изотермы газа в объёме доменной печи при разном характере осевой отдушины: по вертикали – расстояние от верха печи («технологический ноль»), по горизонтали – расстояние от оси, м.

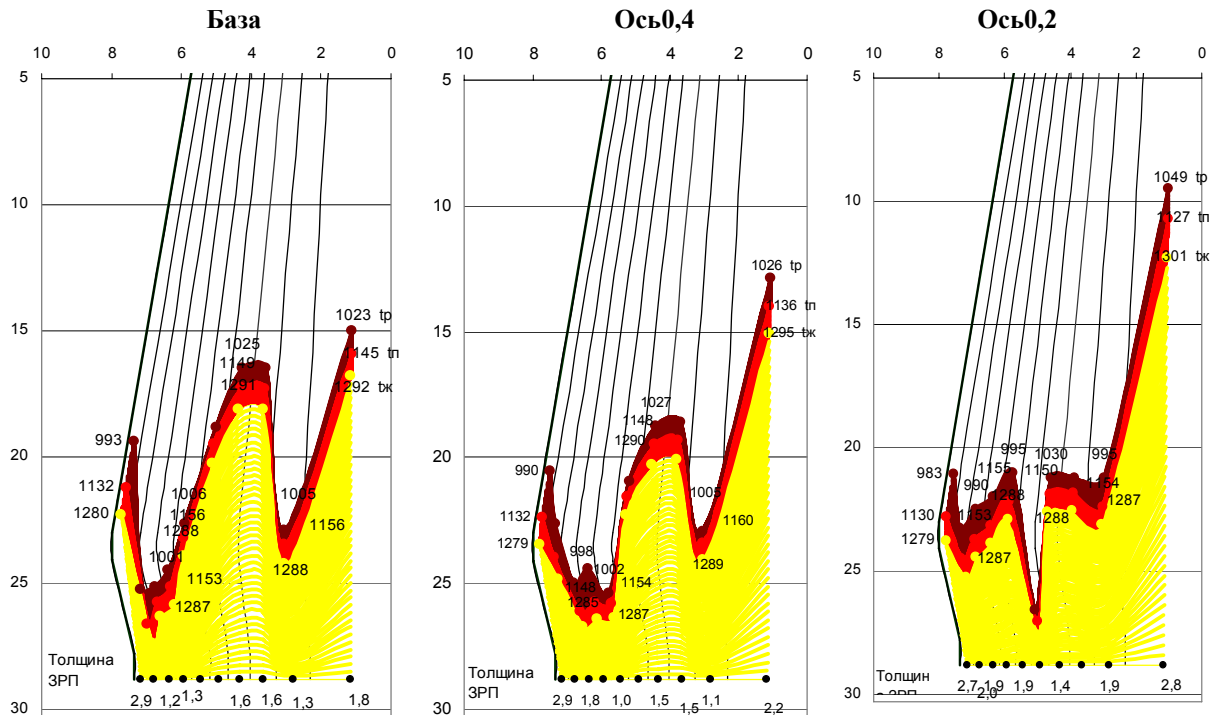


Рис.2. Конфигурация и параметры зоны размягчения (черное), плавления (темно-серое) (ЗРП) и полного ожигения (светло-серое) при разном характере осевой отдушины: по вертикали – расстояние от верха печи («технологический ноль»), по горизонтали – расстояние от оси, м, внизу – толщина ЗРП (от начала размягчения до начала полного ожигения), м.

Числа t_p , t_n , $t_{ж}$ – температуры начала размягчения, плавления и ожигения.

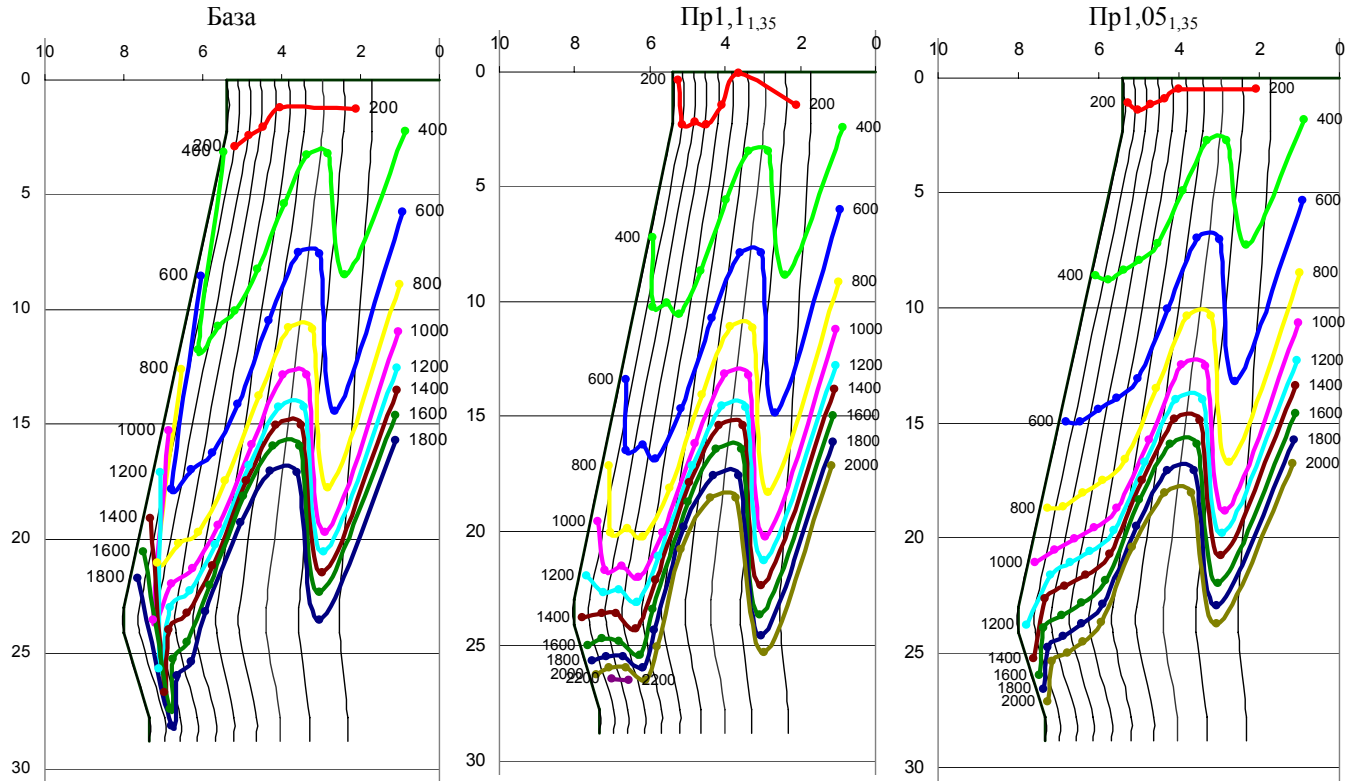


Рис.3. Изотермы газа в объёме доменной печи при разном характере периферийной отдушины: по вертикали – расстояние от верха печи («технологический ноль»), по горизонтали – расстояние от оси, м.

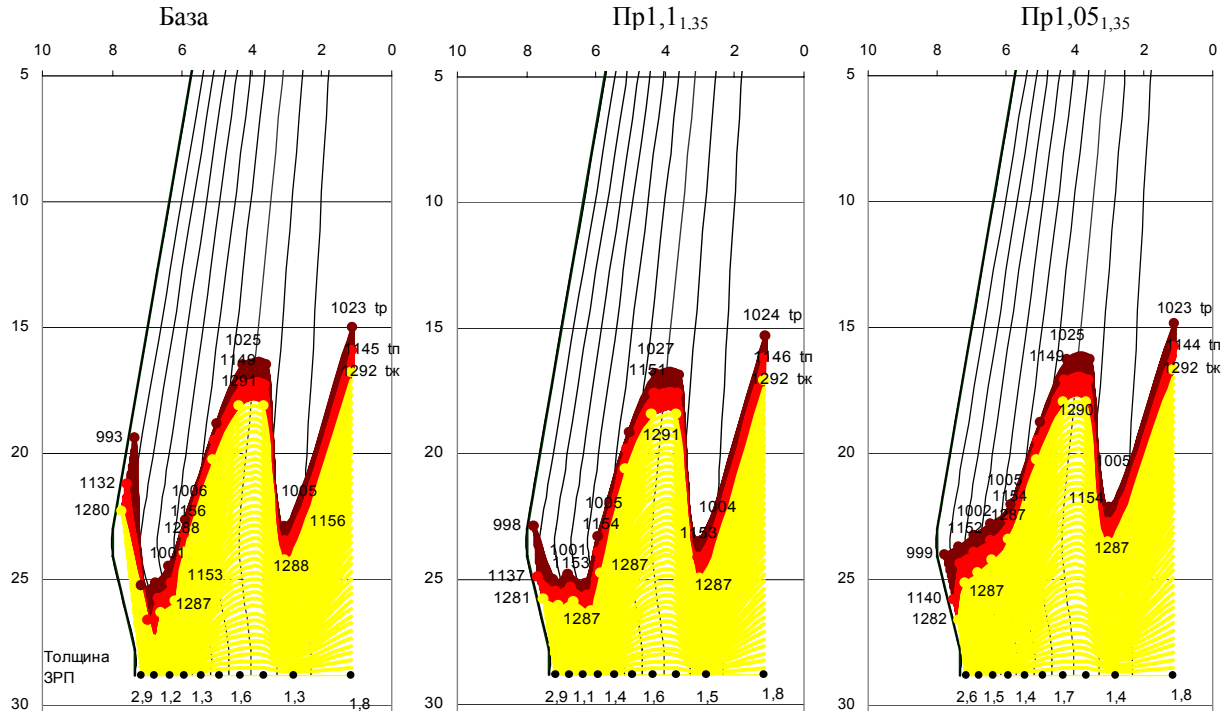


Рис.4. Конфигурация и параметры зоны размягчения (черное), плавления (темно-серое) (ЗРП) и полного ожигения (светло-серое) при разном характере периферийной отдушины: по вертикали – расстояние от верха печи («технологический ноль»), по горизонтали – расстояние от оси, м, внизу – толщина ЗРП (от начала размягчения до начала полного ожигения), м.

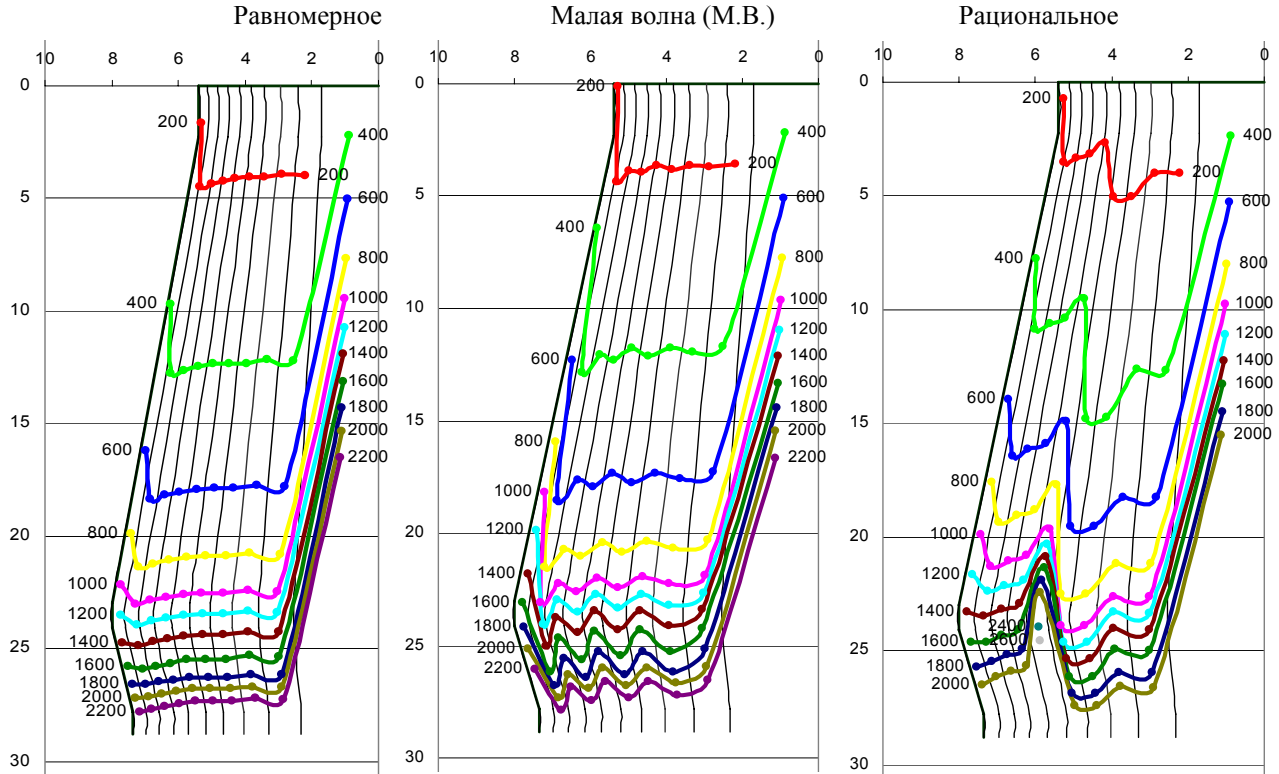


Рис.5. Изотермы газа в объёме доменной печи при разном характере распределения материалов: по вертикали – расстояние от верха печи («технологический ноль»), по горизонтали – расстояние от оси, м.

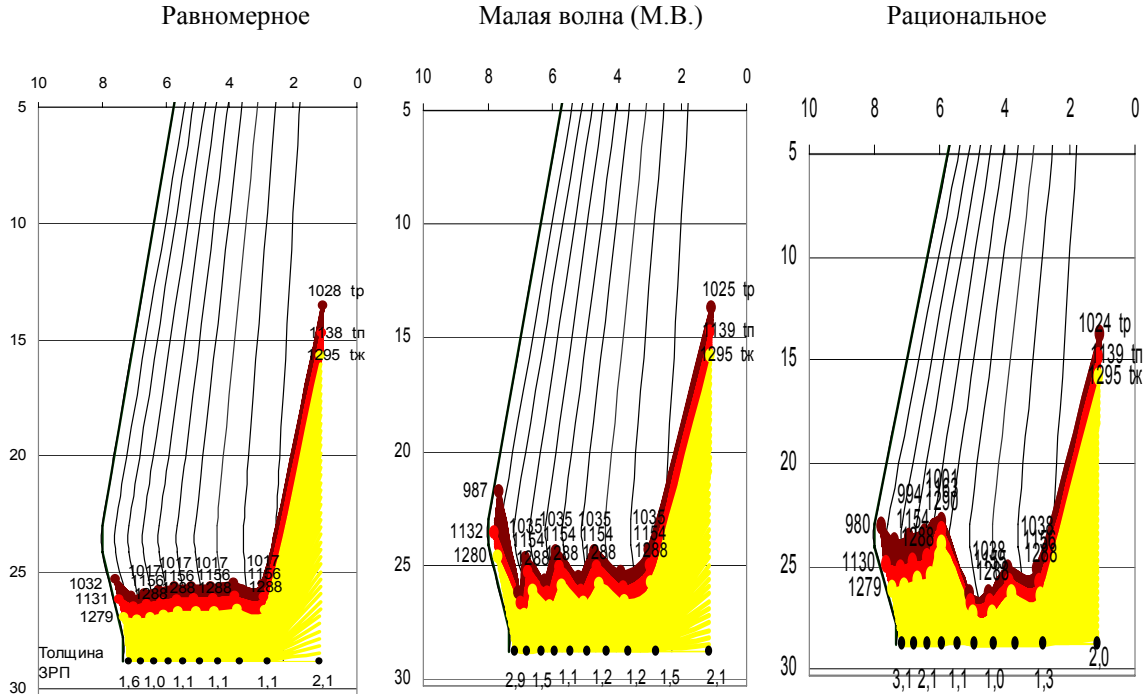


Рис.6. Конфигурация и параметры зоны размягчения (черное), плавления (темно-серое) (ЗРП) и полного ожигения (светло-серое) при разном характере распределения материалов: по вертикали – расстояние от верха печи («технологический ноль»), по горизонтали – расстояние от оси, м, внизу – толщина ЗРП (от начала размягчения до начала полного ожигения), м

Осевую отдушину сформировали при двух вариантах относительной РН в РКЗ–1: 0,4 и 0,2 и сравнили показатели с базовым вариантом (таблица, рис.1,2). Расчетное распределение температур газа над поверхностью засыпи (°С) было:

№ РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
База	329	177	270	274	223	181	166	162	156	322
Ось0,4	394	170	216	218	185	150	156	154	175	289
Ось0,2	570	168	167	168	114	171	163	160	155	262

По мере уменьшения РН у оси температура газов здесь увеличивается при одновременном уменьшении её у периферии. Характер температурного поля (рис.1) изменяется при этом в направлении смещения прицентральных изотерм в верхние горизонты печи, а промежуточных и припериферийных – в нижние с перемещением критической зоны (с наибольшей высотой) из РКЗ–9 в РКЗ–8 (вар. Ось0,4) и РКЗ–5 (вар. Ось0,2), причем в последнем случае имеет место вырождение верхней ступени теплообмена в РКЗ–5.

Зона размягчения и плавления (ЗРП) в варианте Ось0,4 более благоприятна для использования теплоты, т.к. небольшое перемещение ЗРП вверх и соответствующее сокращение твердофазной зоны наблюдается только у оси (рис.2), а перемещение вниз и соответствующее увеличение твердофазной зоны имеет место в остальных ЗРП. В варианте Ось0,2 влияние ЗРП менее благоприятно, т.к. перемещение её вверх у оси более значительно при увеличении толщины ЗРП от 1,8 (База) до 2,8 м. При уменьшении температуры у периферии (РКЗ–10) температура в припериферийных зонах и у оси увеличилась. Температурное поле печи (рис. 3) изменилось в направлении сдвига припериферийных изотерм в нижние горизонты печи при малозначительном перемещении прицентральных изотерм вверх. При этом критическая зона (с наибольшей высотой) перемещается из РКЗ–9 в базовом варианте (Пр1,2) в РКЗ–10 в варианте Пр1,05_{1,35}. Производительность печи в варианте Пр1,1 увеличивается относительно базовой, а в варианте Пр1,05 уменьшается. Дальнейшее повышение РН в РКЗ–10 в последнем случае неблагоприятно для процессов тепло–массообмена. При используемых в базовом периоде шихтовых материалах, когда Пр=1,2, дальнейшее увеличение РН у периферии вполне допустимо с сохранением отдушины, однако общая эффективность плавки зависит от характера загрузки других зон – осевой (РКЗ–1) и промежуточных (РКЗ–2–9).

Промежуточная зона включает РКЗ–2–9, загруженные основной массой железорудных материалов, от распределения которых в решающей мере зависит использование энергии газового потока. Лучшим вариантом загрузки является близкое к равномерному распределение РН в РКЗ–2–9, однако его реализация затруднительна и не всегда целесообразна при существующем качестве сырья. Тем не менее, этот вариант важен

для анализа как предельный по технологической эффективности. Результаты расчета этого варианта и других возможных вариантов распределения РН в промежуточной зоне, приведены в табл. 1 и на рис.4,5. Значения температуры газа над поверхностью засыпи следующие ($^{\circ}\text{C}$):

№ РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Равн	311	114	114	115	115	115	115	116	116	187
М.В.	317	123	121	124	122	124	122	125	121	232
Б.В.	332	139	128	140	127	140	127	142	129	245
Рац	308	117	117	109	109	138	131	131	131	212

Равномерное распределение РН в РКЗ–2–9 при заданных РН у оси и периферии приводит к увеличению объема твердофазной зоны (рис. 4, 5), что способствует уменьшению температуры колошникового газа, степени прямого восстановления и тепловых потерь (табл. 1). В результате в варианте Равн достигается наименьший расход кускового топлива, к которому следует стремиться в данных условиях, и наибольшая производительность. Колебания РН в смежных РКЗ–2–9 приводят к ухудшению показателей тем больше, чем больше амплитуда колебаний (вар. М.В., Б.В.).

Последнее связано с неблагоприятными для общего использования энергии газов перетоками газа по высоте столба шихты. При выборе рационального варианта распределения РН (Рац) исходили из необходимости приблизиться к вар. Равн при ограниченных исходных данных для такого распределения шихты и несовершенстве качества сырья. Рациональным оказалось постепенное увеличение РН от оси к периферии. Расчетные показатели варианта Рац оказались близки к Равн. Целесообразность реализации такого варианта будет уточнена в дальнейшем при установлении реальных параметров распределения газов, расчете соответствующих им распределений РН и показателей плавки по используемой в настоящей работе методике.

Заключение. Расчетно–аналитическое исследование процессов доменной плавки с помощью многозонной модели позволяет до установки программы загрузки в системе управления печью предварительно определять рациональное распределение рудных нагрузок на колошнике, отвечающее наилучшим показателям плавки в данных условиях.

Установлено экстремальное влияние параметров осевой и периферийной отдушин на расход кускового топлива и решающее значение распределения рудных нагрузок в промежуточных зонах на формирование режимов, отвечающих минимальному расходу топлива. Для приближения к минимальному расходу топлива в данных условиях необходимо применение обоснованных расчетами программ загрузки шихты, обеспечивающих близкое к рациональному распределение рудных нагрузок на колошнике.

1. *Гулыга В.И.* Производительность и профиль современной доменной печи. // Вестник металлопромышленности, 1925. – №1–2. – С.14–30.
2. *Воловик Г.А.* Достижения в использовании восстановительной способности газов и перспективы ее дальнейшего улучшения. // М.: Metallurgy, 1986. – 22с.
3. *Логинов В.И., Мусиенко К.А., Гончаров А.Д.* О размере центральной отдушины столба шихтовых материалов в доменной печи // Сталь.–№12.–1989.–С.13–17.
4. *Товаровский И.Г.* Системный анализ показателей доменной плавки / Познание процессов доменной плавки. Коллективный труд под ред. В.И. Большакова и И.Г. Товаровского. Днепропетровск: «Пороги», 2006. – С.296–321.
5. *Аналитическое исследование влияния зоны размягчения и плавления на процессы и показатели доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.И. Большаков, Д.Н. Тогобицкая и др.* // Сталь. – 2008. – № 12. – С. 3–7.

*Статья рекомендована к печати:
ответственный редактор
раздела «Доменное производство»
академик НАН Украины В.И.Большаков,
рецензент канд.техн.наук И.Г.Муравьева*

І.Г.Товаровський, О.Е.Меркулов, Ф.М.Шутилєв, В.В.Лебідь

Дослідження впливу параметрів віддушин на хід доменної плавки з використанням багатозонної математичної моделі

Метою роботи є вивчення впливу параметрів віддушин на хід доменної печі з використанням математичної моделі. Показано, що підвищення ефективності доменної плавки за рахунок удосконалення розподілу шихтових матеріалів в печі слід вести у напрямі пошуку раціонального розподілу рудних навантажень в кільцевих зонах по радіусу колошника, звертаючи особливу увагу на осьову і периферійну зони.