

УДК: 669.162.2:669.162.215.2

В.И.Большаков, И.Г.Товаровский, Н.А.Гладков, Ф.М.Шутылев

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА КОЛОШНИКЕ И
ТЕРМО–ФИЗИКО–ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБЪЁМЕ
ДОМЕННОЙ ПЕЧИ***Институт черной металлургии НАН Украины*

Приведены результаты расчетно–аналитического исследования распределения материалов на колошнике, которые позволили осуществить научно обоснованный выбор рациональных параметров загрузки на основе выявленных закономерностей развития процессов и количественной оценки их влияния на показатели плавки.

Задачи дальнейшего совершенствования технологического режима доменной плавки, уменьшения ее энергоемкости и повышения экономичности можно решить только на основе дальнейшего углубления знаний и выявления новых закономерностей хода процессов [1–3]. Решение этих задач включает в качестве одного из важнейших компонентов управление распределением шихты на колошнике [1]. При этом применявшаяся ранее оценка эффективности управления по начальному и конечному состояниям в настоящее время не отвечает возросшим требованиям к качеству управления. Для принятия эффективных управленческих решений назрела необходимость в углублении знаний о процессах в локальных объемах агрегата с выявлением лимитирующих звеньев и системной оценке комплекса процессов плавки. С этой целью Институт черной металлургии в рамках целевого проекта НАН Украины выполнил в 2002–2006 г.г. комплексное исследование, направленное на решение поставленной задачи.

Методической основой указанной работы было математическое моделирование и аналитическое исследование комплекса процессов с использованием экспериментальных и производственных данных, накопленных сотрудниками Института.

Распределение шихтовых материалов в доменной печи

Доменная плавка является комплексом разнообразных взаимосвязанных противоточных процессов, протекающих в относительно обособленных зонах печи с различным состоянием шихтовых материалов:

- «сухой» (твердофазное состояние);
 - зоне когезии (вязко–пластическое состояние);
 - жидкостной (фильтрация расплавов через коксовую насадку);
 - фурменной (газификация топлива);
 - зоне малоподвижной коксовой насадки в центре горна («тотермана»
- по устоявшейся старой терминологии немецкого происхождения);
- копильника продуктов плавки и буферной массы кокса в нижней части горна.

Элементы структуры в сухой и жидкостной зонах и структура столба шихты в целом в значительной мере зависят от распределения материалов на колошнике печи, что необходимо учитывать при формировании программы загрузки, а оценка этой зависимости без математического моделирования в полной мере невозможна.

В соответствии с разработанной в ИЧМ научно – методической базой, управление распределением шихтовых материалов в печи осуществляется на основании расчета программ загрузки шихты с использованием показателей распределения по радиусу печи: рудных нагрузок и объемов шихтовых материалов за цикл загрузки в равновеликих по площади кольцевых зонах по радиусу колошника [4]. Исходный график радиального распределения рудных нагрузок ориентируется на заданное распределение CO_2 по радиусу печи, коэффициент корреляции которых, например, для ДП–5 ОАО «Северсталь» не ниже 0,8. В случае необходимости программа корректируется в соответствии с требуемыми показателями распределения CO_2 [1, 4]. Программа загрузки, обеспечивающая заданное распределение рудных нагрузок и объемов материалов по радиусу колошника может быть составлена путем достаточно большого количества сочетаний различных наборов рабочих позиций распределителя и масс материалов при их выгрузке в печь. Выбор наилучшего сочетания распределения порций в программе и используется для управления газопроницаемостью столба шихты и распределением физико–химических свойств шихтовых материалов.

Для диагностики распределения шихты на колошнике используются различные приемы, в частности, определяются уровень поверхности засыпи по радиусам колошника, устанавливается распределение температур, перепады давления и состав газа по двум–четырем радиусам под или над уровнем засыпи методом зондирования в шахте печи, температуры периферийных газов и газа в газоотводах, а также с помощью профилометров определяются толщины слоев железорудных материалов и кокса в печи. Этот минимальный перечень параметров, измерение и анализ которых необходим для принятия обоснованных решений при выборе рациональной программы загрузки.

Многолетний опыт (с 1978 года) освоения и исследования технологии доменной плавки на доменных печах, оборудованных бесконусными загрузочными устройствами (БЗУ), позволил нам сделать однозначный вывод, что полужемпирический поиск показателей рационального распределения шихты и газов – путь долгий и недостаточно эффективный. Поэтому в ИЧМ разработана инженерная методика оценки, обоснованного и оперативного расчета показателей распределения и выбора программ загрузки, математическая модель распределения шихтовых материалов по радиусу колошника и ряд других алгоритмов и моделей, создавших базу для перехода к автоматизированному расчету программ загрузки на основе количественного анализа процессов доменной плавки в кольцевых се-

чениях по высоте печи при заданном распределении материалов на колошнике. Одним из важных этапов этих исследований является поиск связи между функциональными особенностями структуры столба шихтовых материалов в печи с распределением рудных нагрузок и физико-химических характеристик разнородных шихтовых материалов по радиусу печи.

Сведения о рациональных вариантах распределения рудных нагрузок на колошнике базируются на учете состояния и поведения материалов и газов в сухой зоне печи, а эффективность того или иного распределения материалов оценивают степенью использования тепловой и восстановительной способности газового потока (η_{CO}) [4, 5].

Поиск рациональной программы загрузки печи иллюстрируется двумя программами, разработанными авторами для доменной печи объемом 5500 м^3 в 1992 году. Первая (таблица 1) использовалась на печи под наблюдением 12 суток, а вторая (таблица 2) – 21 сутки. Эти программы выбраны из 40 архивированных программ загрузки, применявшихся с 1987 г. по 2000 г. и дополнены показателями плавки. Эффект уменьшения расхода кокса для выбранных программ на 5,2 кг/т чугуна и увеличения степени использования CO на 1,32% (таблицы 1, 2) получен, в основном, за счет перераспределения масс материалов, выгружаемых по угловым позициям распределителя в равновеликие по площади зоны по радиусу колошника. Массы по угловым позициям для железосодержащих материалов и кокса здесь являются заданием в систему управления, а распределение по равновеликим зонам радиуса колошника – результатом расчета с помощью математической модели ИЧМ.

В программе, представленной в таблице 2, в сравнении с программой (таблица 1) была уменьшена на 1 т масса железосодержащих в 7 угловой позиции, а в 4 – увеличена на эту же величину. Масса кокса увеличена в 8 угловой позиции на 0,4 т, а в позициях 7–4 задана равной, по 5,8 т. Анализ результатов моделирования распределения материалов по равновеликим зонам радиуса колошника показал, что положительный эффект от изменения программы загрузки получен в основном за счет увеличения рудной нагрузки во 2 зоне, а также, хотя и менее существенной, в 3 и 4 зонах, при этом незначительно уменьшена рудная нагрузка в 10 зоне. Увеличение рудной нагрузки в зонах 1 и 2 обеспечило увеличение содержания CO_2 в 1 зоне, а даже незначительное уменьшение рудной нагрузки в 8 и 10 и увеличение в 9 зонах увеличило содержание CO_2 в периферийных зонах колошника. Изменения в программе загрузки позволили за первые трое суток увеличить среднюю рудную нагрузку с 3,96 до 4,05. Следует отметить, что такое тонкое управление распределением доступно лишь опытному разработчику программ загрузки, способному охватить весь комплекс технологических параметров и знаний в управлении распределением шихтовых материалов по радиусу колошника. Взаимосвязь позонного распределения рудных нагрузок и физико-химических характеристик

компонентов подтверждена нашими исследованиями, в том числе на конкретных доменных печах, оборудованных БЗУ [1,4,5].

Таблица.1. Программа загрузки ДП-5 ОАО «Северсталь» 25.06.–6.07.1992 г.

Производство, т/сут.	Расход кокса, т/т	Степень исп. СО, %	Простои, %
привед. 10677	привед. 419,9	45,9	2,11

Параметры распределения	Распределение по позициям распределителя и соответствующим им равновеликим зонам по радиусу колошника										Сумма
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
а) По позициям распределителя											
• Масса железосодержащих материалов, т	–	16	21	22	22	20	19	–	–	–	120,0
• Масса кокса, т	–	–	6,0	6,0	6,1	6,1	6,1	–	–	–	30,3 т
• Рудная нагрузка	–	6,17		3,67	3,61	3,28	3,11	–	–	–	3,96 т/т
б) По равновеликим зонам радиуса колошника											
• Масса железосодержащих материалов, т	13,49	13,20	13,04	12,68	12,36	12,01	11,76	12,54	11,72	7,2	120,0
• Масса кокса, т	2,66	2,73	2,77	2,86	2,95	3,04	3,09	2,89	3,09	4,23	30,3 т
• Рудная нагрузка	5,07	4,84	4,71	4,44	4,20	3,95	3,80	4,34	3,97	1,7	3,96 т/т
в) По радиусу печи	Точки отбора газа										
	8	7	6	5	4	3	2	1	по печи		
• Распределение СО ₂	22,7	22,7	22,4	20,4	19,6	17,4	13,0	5,3	20,37		

Из рис.1 следует, что соответственно возрастанию рудной нагрузки от оси печи до зоны №3 синхронно изменяются и физико-химические показатели, отражающие развитие в этой области процессов плавления. В области изменения рудных нагрузок в районе зон № 4 – № 6, представляющих своеобразную «впадину», физико-химические параметры развиваются разнонаправлено, отражая, очевидно, суть протекающих в печи процессов. Выделяется также совокупность зон 7–9, в которых рудная нагрузка возрастает, а изменение физико-химических параметров соответствует развитию процессов формирования жидких фаз в этой зоне. Наконец, отдельно выделяются осевая №1, приосевая №2 и периферийная зона №10, являющиеся весьма восприимчивыми к изменению в них массы и

ситового состава шихтовых материалов и по своей роли являются регулирующими.

Таблица.2. Программа загрузки ДП-5 ОАО «Северсталь» 08.07–28.07.1992 г.

Производство, т/сут.	Расход кокса, т/т	Степень исп. CO, %	Простои, %
привед. 10717	привед. 414,7	47,22	7,25

Параметры распределения	Распределение по позициям распределителя и соответствующим им равновеликим зонам по радиусу колошника										Сумма
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
а) По позициям распределителя • Масса железосодержащих материалов, т • Масса кокса, т • Рудная нагрузка	–	16	21	21	22	20	20	–	–	–	120,0 т
	–	–	6,4	5,8	5,8	5,8	5,8	–	–	–	29,6 т
	–	5,78		3,6	3,79	3,45	3,44	–	–	–	4,05 т/т
б) По равновеликим зонам радиуса колошника • Масса железосодержащих материалов, т • Масса кокса, т • Рудная нагрузка	13,30	13,09	12,77	12,48	12,21	11,89	11,81	12,85	12,15	7,45	120,0 т
	2,64	2,69	2,77	2,84	2,91	3,00	2,98	2,82	2,93	4,03	29,6 т
	5,04	4,87	4,61	4,39	4,20	3,96	3,96	4,56	4,15	1,85	4,05 т/т
в) По радиусу печи • Распределение CO ₂	Точки отбора газа										
	8	7	6	5	4	3	2	1	по печи		
	23,3	23,8	22,4	20,9	19,2	17,5	9,8	7,3	20,96		

Взаимное расположение основных элементов структуры столба шихты на примере доменной печи объемом 5500 м³ показано на рис.2, где нанесены лучи движения шихтовых материалов, ограничивающие равновеликие зоны. Для лучшего ($\eta_{CO}=47,22\%$) периода работы доменной печи приведена рассчитанная в соответствии с параметрами плавки протяженность очага горения (рис.2, точка 1), обозначена глубина проникновения фурменного (горнового) газа в направлении оси печи в соответствии с технологическими параметрами (точка 2). Точка 3 обозначает пересечение оси фурм и середины кольцевой зоны №3, ограничивающей диаметр «тотермана» по оси фурм за счет создания в этой зоне увеличенной рудной нагрузки и образования на поверхности «тотермана» плотной размягченной и жидкой массы. Обычно именно здесь резко возрастает сопро-

тивление продвижению зонда, вводимого при исследованиях через фурмы [5].

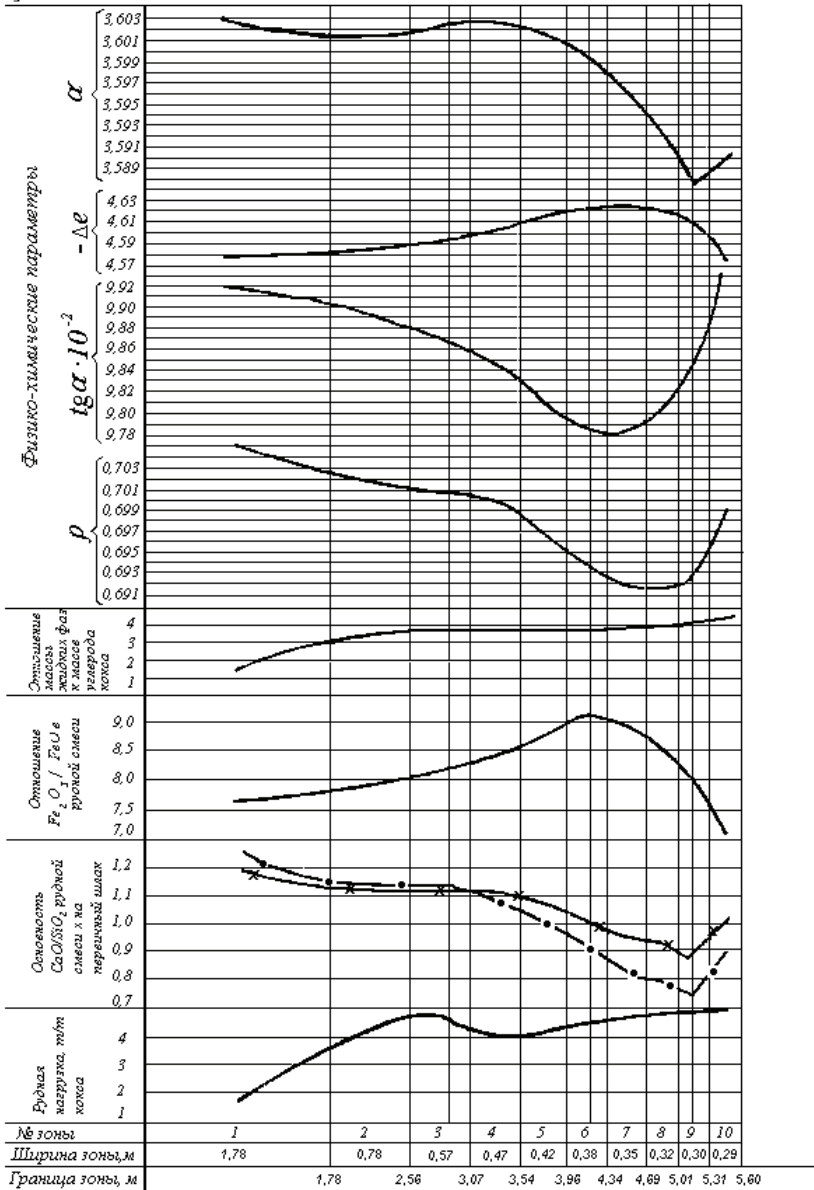


Рис. 1. Связь распределения рудных нагрузок с физико-химическими параметрами шихтовых материалов.

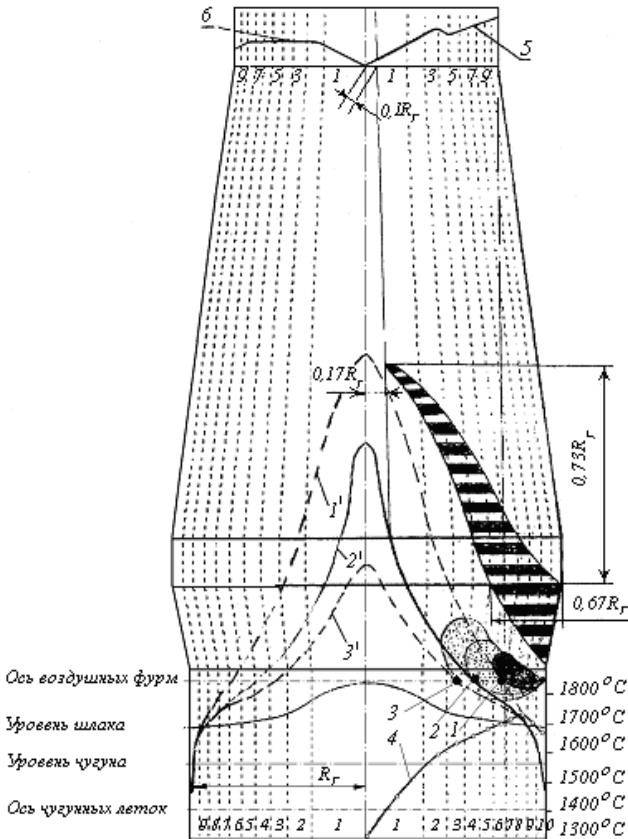
Эти характерные точки определяют контур поверхности «тотермана». Его поверхность, включающая характерные контролируемые при зондировании точки 2 и 3 определяют нижнюю границу коксовой насадки. На рис.2 также показана линия, ограничивающая поверхность осевой коксовой отдушины, играющая важную роль в распределении газового потока и формировании коксовой насадки. Показан рассчитанный по методике ИЧМ профиль зоны «когезии» [1]. По-видимому, большая доля кокса в осевой зоне и частичное его участие в формировании «тотермана» способствует опусканию кокса в расплав под ним и последующим перемещением и всплыванием в области фурменной зоны. Основная функция осевой коксовой отдушины состоит в организации более интенсивного газового потока в осевой зоне печи. Повышенная температура газов и материалов в этой зоне обеспечивает тепловой резерв для стабилизации хода процессов в доменной печи.

Кольцевые зоны № 4–6 выполняют важную роль в формировании осевой отдушины. Они ограничивают диаметр отдушины за счет ощутимого увеличения в них рудной нагрузки. Практический опыт управления распределением потока газов по сечению печи показал, что доменные печи большого объема работают более устойчиво и эффективно при увеличении в этих зонах толщины слоев кокса (коковых окон в зоне плавления) [6]. Зона № 5 разделяет осевую и приосевую зоны и зоны № 6–9, т.е. промежуточную между осевой и периферийной. Через эти зоны в печи проходит основное количество восстановительного газа и в них специалисты стремятся создать наибольшие рудные нагрузки с равномерным их распределением в промежуточной зоне. В этих зонах фильтруется наибольшее количество жидких фаз, а материалы, поступающие из этих зон в нижние горизонты, попадают под активное воздействие высокотемпературных газов у фурм.

Режим работы периферийной, пристенной зоны № 10 зависит от дутьевого режима печи, величин рудных нагрузок и газопроницаемости. Интенсивность движения газов в этой зоне существенно влияет на тепловые потери через систему охлаждения и температуру газов в её верхней части, формирование и устойчивость гарнисажа. Формирование корня зоны «когезии» в заплечиках и горне существенно влияет на распределение газов, дутьевой режим и тепловое состояние плавки в целом. Применение бесконусных загрузочных устройств позволяет эффективно управлять интенсивностью газового потока в периферийной и осевой зонах с целью повышения устойчивости хода и уменьшения потерь энергии.

Анализ программ загрузки, применявшиеся на доменной печи объемом 5500 м³, подтвердил тесную взаимосвязь и существенное влияние распределения шихтовых материалов по радиусу колошника на распределение состава и свойств жидких фаз в печи и технико-экономические показатели плавки. В существующих шихтовых условиях предельная величина степени использования восстановительной способности газов η_{CO}

достигает 51,3%. Величина $\eta_{CO}=52\%$, достигнутая на доменных печах Японии, объясняется, кроме прочего, применением хорошо подготовленных шихтовых материалов.



- Точки 1,2,3 – границы распространения фурменных очагов по оси фурм.
 1' ,2' ,3' – границы поверхности «тотермана», соответствующие границам фурменных очагов
 4 – характер распределения температуры по оси фурмы °С.
 5 – график распределения рудных нагрузок.
 6 – характерный профиль поверхности засыпи.
 R_г — радиус горна.

Рис.2. Профиль доменной печи объемом 5500 м³ и некоторые структурные элементы столба шихтовых материалов.

Развитие процессов тепло– и массообмена по высоте и радиусу доменной печи

Методика исследования [7] предназначена для количественного анализа процессов доменной плавки в радиальных кольцевых сечениях по высоте печи при заданном распределении материалов на колошнике.

Протекание процессов теплопередачи и восстановления железа в кольцевых зонах по высоте столба шихты описывается дискретно системной 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.

Равновеликие по горизонтальной площади кольцевые зоны соответствуют 10 положениям лотка бесконусного загрузочного устройства и отличаются друг от друга соотношением компонентов шихты (в первую очередь кокса и железорудной части), задаваемым программой загрузки и вычисляемым в модели загрузки. В соответствии с разной газопроницаемостью материалов в кольцевых зонах через каждую из них проходит разное количество газа, непрерывно перетекающего из зон с большим газодинамическим сопротивлением в зоны с меньшим газодинамическим сопротивлением.

Таким образом, весь объем столба шихты разбит на $10 \times 12 = 120$ «ячеек», для каждой из которых выполняется расчет зонального материально–теплого баланса, увязанного с общим материально–тепловым балансом печи. В уравнения балансов входят расчеты восстановительного процесса для каждой зоны и температуры на границах зон. При заданных кинетических характеристиках восстановления и теплопередачи выполняется расчет высот каждой из зон и времени пребывания в них материалов, которые увязаны с общей высотой и временем пребывания материалов в печи. Высоты индексируются номерами вертикальных температурных зон (ВТЗ) сверху вниз – верхний индекс (с 1 по 12) и радиальных кольцевых зон (РКЗ) от центра к периферии – нижний индекс (с 1 по 10).

Для расчета процессов и сведения балансов в вертикальных зонах требуется знать не только количественный и качественный состав материалов, загружаемых в каждое кольцевое сечение и определяемый по модели загрузки шихты, но также количество газа, поступающего в каждое из этих сечений снизу (из фурменной зоны). Последнее требует решения задачи распределения газа между кольцевыми сечениями разной газопроницаемости. При этом изобары должны располагаться перпендикулярно линиям схода шихты, что не противоречит полученным в разных исследованиях экспериментальным данным.

В соответствии с принятым положением изобар по радиусу столба шихты на разных горизонтах – перпендикулярно линиям схода шихты, распределение газа по кольцевым сечениям определяется газопроницаемостью кольцевых сечений и зависит, главным образом, от соотношения загруженных в каждое кольцевое сечение количеств кокса и железорудных материалов, а также их газодинамических характеристик, которые оценивают величинами порозности и поверхности кусков слоя или линейным размером пустот (аналог гидравлического диаметра).

Определив положение изобар по высоте печи и вычислительные последовательно высоты зон, связываем в ходе итерационного расчета параметры газомеханики (давления, скорости, расходы и др.) с параметрами тепло- и массопередачи (температуры, концентрации, степени восстановления и др.) по высоте и сечению печи.

На основе рассчитанных балансовых величин определяются параметры теплопередачи в зонах (теплоемкости потоков шихты и газа, отношение теплоемкостей), а также оценивается величина объемного коэффициента теплопередачи, для установления которой предпринято специальное аналитическое исследование [7].

Распределение материалов в радиальных кольцевых зонах рассчитывается по исходным данным на верхней границе загрузки шихты (ВТЗ–0), включающим расход железорудной шихты R_{Σ} и его доли по РКЗ $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{10}$, а также расход кокса K и его доли по РКЗ $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{10}$, которые определяют в ходе расчета, причем $\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_{10} = 1$, и $\Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_{10} = 1$. Насыпные объемы железорудной шихты и кокса определяют из выражения: $(VR) = R_{\Sigma}/(\gamma_R)$; $(VK) = K/(\gamma_K)$; м³/т чугу.

В качестве исходных величин при определении параметров загрузки задаются относительные рудные нагрузки – отношения рудных нагрузок в отдельных РКЗ к рудной нагрузке для печи в целом.

Выполнение расчетов общих и многозонных балансов в радиальных кольцевых и вертикальных температурных зонах при разном распределении материалов на колошнике производится при двух способах задания относительных величин рудных нагрузок RH_i : 1) равномерном в зонах 2–9 при заданных в центре и у периферии RH_1 и RH_{10} ; 2) параболическом – задание RH_i в 3–4 и более РКЗ с аппроксимацией в остальных параболой любого порядка. Указанные способы задания рудных нагрузок на колошнике охватывают практически все возможные варианты загрузки как конусными, так и бесконусными загрузочными устройствами (КЗУ и БЗУ).

Исследование влияния распределения рудных нагрузок по радиусу колошника на показатели процессов плавки выполнено для выявления возможности улучшения показателей плавки путем совершенствования хода процессов теплопередачи и восстановления железа за счет изыскания более эффективных распределений RH по радиусу.

Исследование выполнено для каждой из двух рассмотренных доменных печей при трех режимах плавки – ретроспективном, реальном и пер-

спективном. Реальный режим соответствует существующему на печи. Ретроспективный рассчитан при выводе природного газа и кислорода и снижении температуры дутья до 700°C . В качестве перспективного принят режим с выводом природного газа при вдувании пылеугольного топлива и коксового газа и температуре дутья 1200°C .

Показатели каждого режима рассчитаны при двух распределениях РН – фактическом и условно–равномерном (далее – равномерном). Поскольку последнее может быть реализовано при разной величине РН на периферии, выполнили серии расчетов для каждого режима с выбором наиболее эффективных по топливоиспользованию вариантов. Другие (параболические) распределения, как показано ранее [8], менее эффективны и характерны для конусных загрузочных устройств.

В табл. 3 и 4 приводятся некоторые [9] расчетные результаты исследования.

Анализ приведенных результатов позволяет заключить следующее.

Во всех рассмотренных режимах равномерное распределение РН более эффективно по расходу топлива, чем фактическое. При этом просматривается тенденция к необходимости увеличения РН на периферии по мере сокращения расхода кокса и роста средней РН за счет технологических мероприятий (вдувания ПУТ, КГ, роста температуры дутья и др.). Основными факторами сокращения расхода кокса при переходе к равномерному распределению РН являются:

- улучшение теплопередачи, которое в конечном итоге выражается в уменьшении температуры колошникового газа;
- уменьшение теплопотребности на прямое восстановление за счет снижения его доли и повышения степени использования газов;
- уменьшение удельных теплопотерь через стенки за счет подгрузки периферии и увеличения производительности печи.

Теплофизический механизм улучшения теплопередачи можно проследить по результатам моделирования, приведенным в работе [9]. Выравнивание радиальной неравномерности при переходе к равномерному распределению рудных нагрузок способствует тому, что уменьшается количество РКЗ, в которых верхняя ступень теплообмена вырождается. Вырождение верхней ступени увеличивает общую потребность топлива на компенсацию увеличенной теплопотребности.

На рис.3, отображающем изменение разности температур газа и шихты по высоте столба шихты для ДП №5 «Северсталь», незавершенность выражается в том, что в РКЗ с высокой РН и малым количеством газа уже на нижней границе ВТЗ–1 с температурой 400°C теплопередача заторможена из–за малой разности температур газа и шихты по всей высоте столба. В нижележащих горизонтах создается дефицит теплоты, который должен компенсироваться высокотемпературной теплотой нижних зон, и увеличивается высота низкотемпературных зон. Перераспределение РН

по радиусу ослабляет этот процесс и способствует общему улучшению теплопередачи с уменьшением средней температуры на колошнике.

Таблица 3. Показатели работы ДП объемом 5500 м³ «Северсталь»

Условия: →	Ретроспективные		Реальные		Перспективные	
Распределение рудных нагрузок: →	Фактическое.	Равномерное	Фактическое.	Равномерное	Фактическое.	Равномерное
Рудная нагрузка периферии отн-но средн.	1,24	1,08	1,24	1,15	1,24	1,30
ПОКАЗАТЕЛИ:						
Среднесуточное производство, т	9043	9121	9799	9794	9897	10123
Удельная производительность, т/м ³ сут	1,644	1,658	1,782	1,781	1,80	1,841
Расход твердого топлива, кг/т	544,6	538,3	411,6	410,2	290,9	281,6
В т. ч. кокс	544,6	538,3	411,6	410,2	290,9	281,6
Дутье: расход, м ³ /мин.	9308	9304	7678	7687	7036	7021
температура, град.С	700	700	1184	1184	1200	1200
кислород, %	21	21	24,87	24,87	25	25
Расход природн. газа, м ³ /т	0	0	107,4	107,4	0	0
Расход коксового газа, м ³ /т	0	0	0	0	150	150
Расход угля, кг/т					150	150
Колошниковый газ: температура, °С	220	216	249	248	241	214
содержание, % СО	20,27	19,74	21,45	21,21	20,33	19,84
СО ₂	20,16	20,60	20,19	20,34	21,58	22,08
Н ₂	0,48	0,46	7,12	7,06	7,26	7,25
Железо в шихте, %	59,36	59,37	59,66	59,66	59,94	59,96
Количество шлака, кг/т	321	320	300	300	281	280
Расчетные параметры:						
Теоретическая температура горения, °С	2003	2003	2002	2003	1995	1983
Прямое восстановление оксида Fe, %	36,60	35,43	26,52	25,66	26,19	25,62
Мощность струи дутья, кВт	72,1	72,0	136,8	137,2	136,3	137,4

Таблица 4. Показатели работы ДП объемом 5034 м³ «Криворожсталь»

Условия: →	Ретроспективные		Реальные		Перспективные	
	Фактич.	Равномер	Фактич.	Равномер	Фактич.	Равномер
Распределение рудных нагрузок: →						
Рудная нагрузка периферии отн–но средней	1,18	1,05	1,18	1,20	1,18	1,09
ПОКАЗАТЕЛИ:						
Среднесуточное производство, т	6197	6286	6882	7040	7206	7333
Удельная производительность, т/м ³ ·сут	1,231	1,249	1,367	1,398	1,431	1,457
Расход твердого топлива, кг/т	596,9	588	474,3	463,8	326,4	319,4
В том числе: кокс местный	467,4	460,4	371,4	363,2	255,5	250,1
кокс алтайский	76,4	75,3	60,7	59,4	41,8	40,9
антрацит	53,1	52,3	42,2	41,3	29,0	28,4
Дутье: расход, м ³ /мин.	7310	7310	6263	6243	5801	5797
температура, град.С	700	700	1103	1103	1200	1200
кислород, %	21	21	24,97	24,97	25	25
Расход природного газа, м ³ /т	0	0	93,7	93,7	0	0
Расход коксового газа, м ³ /т	0	0	0	0	150	150
Расход угля, кг/т	0	0	0	0	150	150
Колошниковый газ: температура, °С	238	230	259	249	270	252
содержание, % СО	22,90	22,40	23,75	23,45	22,20	21,94
Железо в шихте, %	55,43	55,44	55,66	55,68	55,93	55,95
Количество шлака, кг/т	384	383	367	366	347	346
Расчетные параметры:						
Теоретическая температура горения, °С	2008	2008	2078	2068	2057	2049
Прямое восстановление оксида Fe, %	38,8	37,6	27,9	27,9	25,9	25,7
Мощность струи дутья, кВт	52,0	52,1	91,1	91,0	106,5	107,3

Результаты моделирования показали также [9], что максимальное развитие прямого восстановления имеет место в РКЗ–1 (центральная), а минимальное – в РКЗ–10 (периферийная). При переходе к равномерному распределению рудных нагрузок происходит выравнивание значений степени прямого восстановления в РКЗ–2–9 и, чаще всего, некоторое уменьшение степени прямого восстановления в РКЗ–1 и РКЗ–10. Это положи-

тельно влияет на расход топлива не только непосредственно через уменьшение общей степени прямого восстановления, но и через перераспределение (выравнивание) теплотребности между РКЗ–2–9. Сокращение теплотеря печи при выравнивании распределения РН в решающей мере зависит от величин РН на периферии.

Фактическое распределение РН Равномерное распределение РН

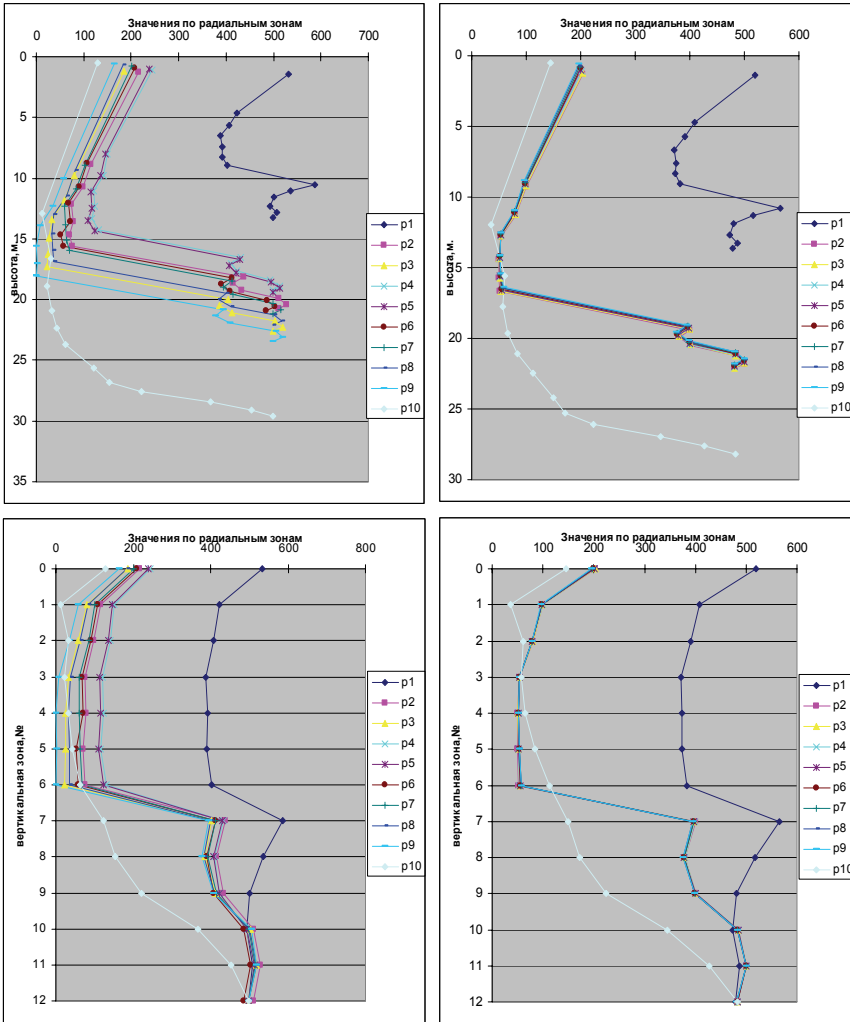


Рис.3. Разность температур газа и шихты (по горизонтали) по высоте ДП №5 «Северсталь» при двух способах распределения РН (по вертикали – расстояние от верха и №№ ВГЗ)

Из сравнительного анализа показателей плавки на двух рассматриваемых доменных печах при разных режимах следует, что величина уменьшения расхода кокса на ДП №5 «Северсталь» при переходе от реального к перспективному режиму меньше (120,7 против 148 кг/т), а увеличение расхода кокса при переходе от реального к ретроспективному режиму больше (133 против 122,6 кг/т), чем на ДП №9 «Криворожсталь». Это обусловлено тем, что достигнутый на ДП №5 «Северсталь» уровень показателей и параметров плавки ближе к предельным условиям, чем на ДП №9 «Криворожсталь».

Оценка и выбор рациональных параметров распределения шихты на колошнике. Использование бесконусных загрузочных устройств, а также современных систем контроля и управления позволяет давать количественную оценку характеру распределения материалов на колошнике [1]. Однако связь характера распределения материалов с ходом процессов в столбе шихты и показателями плавки до сих пор оценивается специалистами на эмпирическом уровне и только качественно. Разработанные в ИЧМ НАН Украины инженерная методика расчета программ загрузки [4] и математическая модель распределения шихтовых материалов по радиусу колошника обеспечили с учетом новых факторов возможность перехода к расчетным методам формирования программ загрузки, как основного инструмента распределения шихтовых материалов по радиусу колошника доменной печи.

Аналитическая оценка показателей эффективности плавки стала возможной на основе методики численного анализа тепло–массообменных процессов доменной плавки по высоте и поперечному сечению доменной печи, позволяющей количественно оценивать влияние различного распределения шихтовых материалов на колошнике при разных параметрах плавки на её конечные результаты [7]. Сочетание аналитического и экспериментального исследований формирует новый экспериментально–аналитический подход как более эффективный инструмент выбора рациональных параметров плавки. Его использование показано на примере доменной печи полезным объемом 5500 м³ [10].

Анализ выполнен для трех распределений рудных нагрузок (РН) по радиусу колошника: РН–1, РН–2 и РН–3. При этом РН–2 (12 суток работы печи) и РН–3 (21 сутки работы печи) – фактическое распределение в указанные периоды, а РН–1 – специально разработанная для исследований программа загрузки для условий РН–3 с намеренным ухудшением показателей распределения и на печи не применявшаяся. Расчеты выполнены для каждого из трех вариантов распределения рудных нагрузок. Результаты приведены на рис. 4 и в табл.5. Варианты расположены в порядке уменьшения расчетного расхода кокса и увеличения степени использования СО.

РРН-1 РРН-2 РРН-3

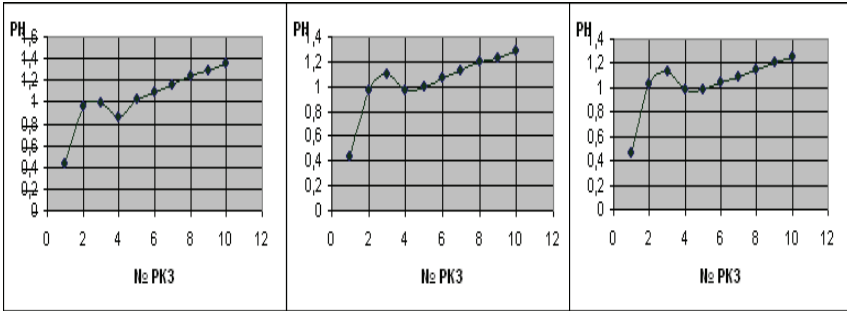


Рис. 4. Три способа распределения относительной рудной нагрузки (РН)

Таблица 5. Показатели работы доменной печи объемом 5500 м³ при разном распределении рудной нагрузки на колошнике

Показатели	При фактической базе с РРН-3			При фактической базе с РРН-2		
	РРН-1	РРН-2	РРН-3	РРН-1	РРН-2	РРН-3
Распред. рудной нагрузки						
Удельная производительность, т/м ³ ·сут	1,631	1,668	1,676	1,802	1,833	1,847
Расход кокса, кг/т	417,8	410,1	408,3	418,8	412,6	409,3
Дутье: расход, м ³ /мин.	6656	6655	6656	7439	7450	7436
температура, °С	1208	1208	1208	1239	1239	1239
кислород, %	25,75	25,75	25,75	25,23	25,23	25,23
Расход природного газа, м ³ /т	97,20	97,20	97,20	95,39	95,39	95,39
Колошниковый газ:						
температура, °С	236,6	206,3	199,8	243,3	215,0	211,8
содержание, % СО	22,26	22,00	21,89	22,21	21,92	21,79
СО ₂	21,24	21,58	21,69	21,00	21,31	21,46
Н ₂	6,74	6,78	6,77	6,56	6,56	6,57
Железо в шихте, %	57,78	57,79	57,80	57,60	57,61	57,62
Количество шлака, кг/т	324	323	323	332	331	331
Расчетные параметры:						
Прямое восстановление оксида Fe, %	27,68	27,74	27,58	29,09	28,80	28,74
Мощность струи дутья, кВт	78,3	78,9	79,0	108,8	109,9	109,6

Анализ результатов моделирования показал следующее: РРН-1, РРН-2, РРН-3 характерны увеличением РН от РКЗ-1 к РКЗ-3 (РН-рудная нагрузка, РКЗ – радиальные равновеликие по площади кольцевые зоны ко-

лошника) с последующим её уменьшением в РКЗ–4 и дальнейшим плавным подъемом от РКЗ–4 к РКЗ–10. При этом скорость увеличения РН от РКЗ–1 к РКЗ–3 для РРН–1 наименьшая, а для РРН–3 наибольшая, а величина последующего уменьшения РН в РКЗ–4 для РРН–1 наибольшая, а для РРН–3 наименьшая. Последовательность изменения распределений РРН–1, РРН–2, РРН–3 характерна увеличением РН в приосевых зонах (РКЗ–2, 3, 4) при повышенной РН у периферии. Указанные тенденции отражаются в более рациональном распределении температур в объеме печи. В результате расход кокса в последовательности РРН–1÷3 снижается, а степень использования тепловой и восстановительной энергии газов увеличивается.

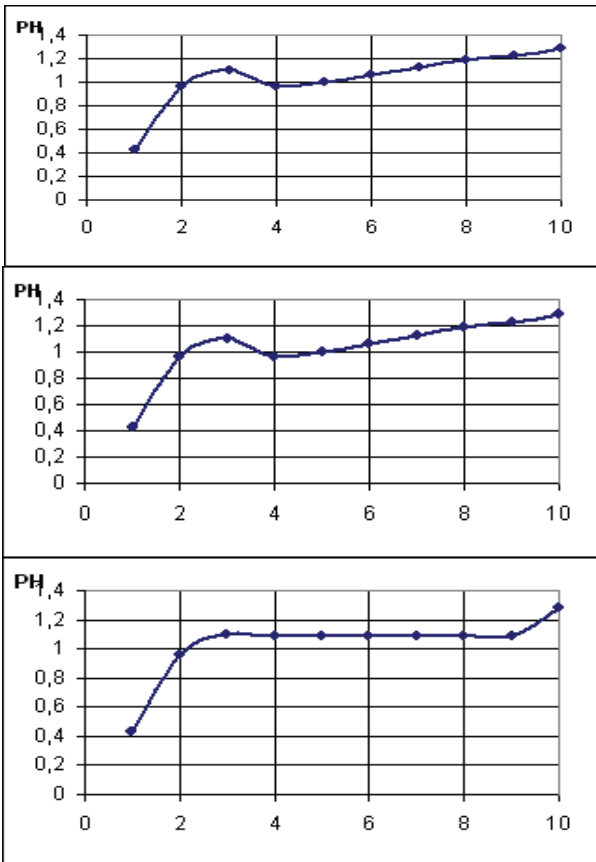
Основными факторами сокращения расхода кокса при переходе к более рациональному распределению РН являются: улучшение теплопередачи, которое в конечном итоге выражается в уменьшении температуры колошниковога газа; уменьшение теплопотребности на прямое восстановление за счет снижения его доли и повышения степени использования газов; уменьшение удельных теплопотерь через стенки за счет подгрузки периферии железосодержащими.

Улучшение радиального распределения газов при переходе к рациональному распределению рудных нагрузок способствует тому, что уменьшается количество РКЗ, в которых вырождается верхняя ступень теплообмена. Вырождение верхней ступени увеличивает общую потребность топлива на компенсацию увеличенной теплопотребности. Рациональное перераспределение РН по радиусу ослабляет этот процесс и способствует общему улучшению теплопередачи с уменьшением средней температуры на колошнике.

Расчетно–аналитическое исследование тепло–массообменных процессов по высоте и поперечному сечению доменной печи совместно с экспериментальным и теоретическим изучением распределения материалов на колошнике позволило выполнить научно обоснованный выбор рациональных параметров загрузки в реальных условиях плавки на основе выявленных закономерностей развития процессов и количественной оценки их влияния на показатели плавки. Дальнейшее совершенствование параметров и программ загрузки шихты определяется возможностями реализации рационального распределения величин рудных нагрузок в радиальных кольцевых зонах, включая как осевую и периферийную «отдушины», так и максимально нагруженные рудными компонентами зоны, в зависимости от дутьевого режима и шихтовых условий плавки. При этом возможности формирования рациональной осевой «отдушины» определяются качеством кокса (особенно загружаемого в центр), железорудного сырья, выбором дутьевых параметров и других технологических факторов.

Для оценки направления совершенствования параметров загрузки шихты выполнили расчеты для тех же условий при различном распределении РН в РКЗ 1–9, некоторые результаты которых представлены на рис.

5. В качестве эталона приняли лучший экспериментально проверенный вариант РРН-3 (вар. 1), характерный резким возрастанием РН от РКЗ-1 до РКЗ-3 с последующим её уменьшением в РКЗ-4 и постепенным почти линейным повышением в РКЗ 4-10. В варианте 2 уменьшили скорость возрастания и уменьшения величины РН в окрестности РКЗ-3 (РРН-3А), а в варианте 3 распределили равномерно РН в РКЗ 4-9 при сохранении её исходного уровня в РКЗ-10 (периферия). В результате расчетный расход кокса в вар. 2 оказался ниже, чем в вар. 1 (405,7 против 408,3 кг/т чугу.), а в варианте 3 – ещё ниже 402,0 кг/т чугу. При этом в вар. 1 и 2 наблюдали незавершенность теплообмена в РКЗ 8 и 9, а в варианте 3 теплообмен завершен во всех РКЗ. Более полная картина улучшения показателей при переходе к равномерному распределению РН в РКЗ 4-9 представлена в табл. 6 и на рис. 6, 7.



Вар.1. Исходное РРН
Расход кокса К=408,3
кг/т
Не завершен тепло-
обмен в РКЗ № 8-9

Вар. 2. Уменьшена
интенсивность изме-
нения РН в РКЗ №3-4
и 4-10 Расход кокса
К=405,7 кг/т
Не завершен тепло-
обмен в РКЗ № 8-9

Вар.3. Равномерное
РРН в РКЗ №4-9 Рас-
ход кокса К=402,0
кг/т
Во всех РКЗ теплооб-
мен завершен

Рис.5. Варианты распределения РН (отн.) по РКЗ 1-10 (№ по оси X)

Таблица 6 – Показатели работы доменной печи объемом 5500 м³ при разном распределении рудной нагрузки на колошнике (РРН)

Показатели	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
Распределение рудной нагрузки	РРН–3	РРН–3А	РРН–4
Удельная производ–сть, т/м ³ сут	1,833	1,847	1,862
Расход кокса, кг/т	408,3	405,7	402,0
Дутье: расход, м ³ /мин.	7450	7437	7424
температура, °С.	1239	1239	1239
кислород, %	25,22	25,22	25,22
Расход природного газа, м ³ /т	95,39	95,39	95,39
Колошниковый газ: темп–ра, °С	215	212	209
содержание, % СО	21,9	21,8	21,5
СО ₂	21,3	21,5	21,7
Н ₂	6,56	6,55	6,55
Железо в шихте, %	57,6	57,6	57,6
Количество шлака, кг/т	332	331	330
Расчетные параметры:			
Теор. темп–ра горения, °С	2082	2078	2074
Прямое восст–е оксида Fe, %	28,8	28,6	28,1
Мощность струи дутья, кВт	109,9	109,7	109,5

Результаты моделирования показали, что по сравнению с лучшим фактическим вариантом РРН–3 возможно дальнейшее улучшение распределения путем рассредоточения рудной нагрузки в РКЗ 4–9 вплоть до равномерного РРН–4. При этом возможно полное исчезновение РКЗ с незавершенным теплообменом по высоте (рис.7), которые при РРН–3 и РРН–3А еще существуют, а также снижение степени прямого восстановления.

Характерно, что максимальное развитие прямого восстановления часто имеет место в РКЗ–1 (центральная), а минимальное – всегда в РКЗ–10 (периферийная). При переходе к рациональному распределению рудных нагрузок происходит сближение значений степени прямого восстановления в РКЗ–4–9 и чаще всего некоторое уменьшение степени прямого восстановления в РКЗ–1 и РКЗ–10. Это положительно влияет на расход топлива не только непосредственно через уменьшение общей степени прямого восстановления, но и через перераспределение (выравнивание) теплопотребности между РКЗ–4–9. Уменьшение теплотерь печи при улучше-

нии распределения РН в решающей мере зависит от величин РН на периферии.

РРН-3 РРН-4

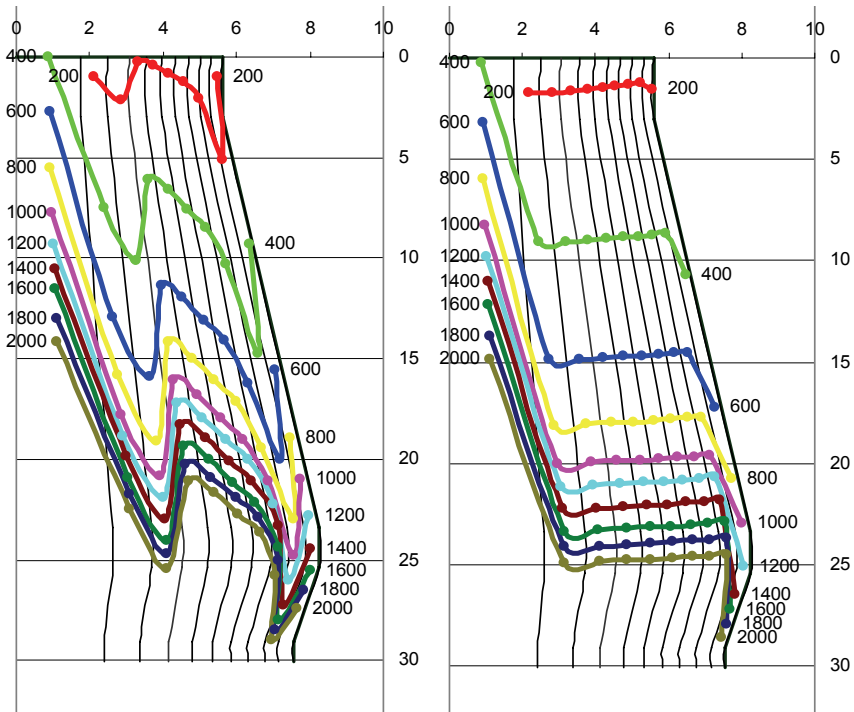


Рис. 6. Влияние исходного распределения рудной нагрузки на температурное поле в объеме печи при лучшем фактическом варианте (РРН-3) и равномерном в РКЗ 4–9 распределении (РРН-4)

Аналитическая оценка технологической эффективности применения бесконусных загрузочных устройств (БЗУ). До настоящего времени оценка технологической эффективности замены конусных загрузочных устройств (КЗУ) бесконусными (БЗУ) выполнялась эмпирически на основе сравнения показателей работы доменных печей, оснащенных КЗУ и БЗУ. Это не позволяло дать оценку «в чистом виде», т.к. в работе печей и в степени использования возможностей управления распределением шихты и газов всегда имеются существенные отличия.

Предложенная авторами методика расчета позволяет количественно оценить не только конечные результаты работы доменных печей, но и расшифровать технологический и физико-химический механизм получения этих результатов. При этом принято, что для КЗУ характерно параболическое распределение РН, которое всегда приводит к появлению РКЗ с

незавершенным теплообменом и высоким развитием прямого восстановления, что предопределяет повышенный расход топлива. Ограниченные (в сравнении с БЗУ) возможности реализации заданного распределения шихты по выравниванию РН по радиусу колошника делают эту особенность органически присущей КЗУ.

РРН-3 РРН-4

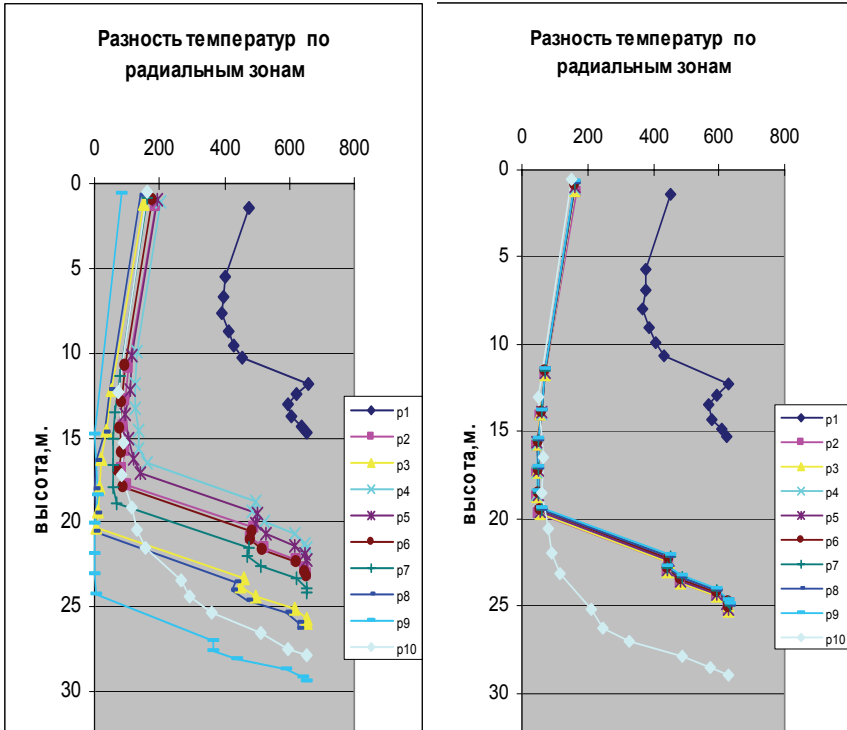


Рис.7. Разность температур газа и шихты по высоте печи для РКЗ 1–10 при двух формах распределения рудной нагрузки (РРН-3 и РРН-4)

Указанное явление иллюстрируется результатами расчетов для ДП-5 ОАО «Северсталь». В работе [11] приведены температуры газов в рабочем пространстве печи и разность температур газа и шихты по высоте РКЗ для трех случаев загрузки шихты: 1 – конусный режим с сосредоточением высоких рудных нагрузок в промежуточных РКЗ; 2 – лотковый режим с некоторым рассредоточением рудных нагрузок в промежуточных РКЗ, имевший место в реальных условиях работы печи; 3 – лотковый режим с максимально-возможным рассредоточением рудных нагрузок в промежуточных РКЗ (расчетный). Результаты расчетов показали, что по мере вы-

равнивания РН в РКЗ 2–9 уменьшается вырождение верхней ступени теплообмена в отдельных РКЗ и стабилизируется теплопередача в печи в целом. Для трех указанных случаев общие результаты плавки следующие:

Режим загрузки	Производительность, %	Кокс, кг/т	Степ. прям. восст., %	Т-ра кол. газа, °С	Теплопотери, кдж/кг чуг.
Конусный	100	436	26,8	321	470
Лотковый фактический	105	416	26,2	261	465
Лотковый равномерный	106	410	25,0	262	452

Впервые на основе предложенной методики выполнена аналитическая оценка преимуществ БЗУ относительно КЗУ, которая показала экономию кокса по меньшей мере 4%, что соответствует оценке фактических результатов уникальной многолетней практики ДП–5 и ДП–6 НЛМК [12].

Выводы

1. На основании анализа реализации разработанных сотрудниками ИЧМ программ и режимов загрузки доменной печи объемом 5500 м³ показано влияние распределения шихты на изменение структуры столба шихты в печи. Установлена специфическая форма распределения рудных нагрузок в равновеликих по площади кольцевых зонах колошника доменных печей при рациональных параметрах загрузки: линейное увеличение от близкой к нулю величины у вертикальной оси печи до некоторого максимума у вертикальной границы проекции «тотермана» на уровень фурм с некоторым уменьшением в этой области и последующим почти линейным возрастанием в направлении периферии. Указанные две области печного пространства отличаются характером протекающих процессов, рациональное сочетание которых позволяет достигать лучших показателей работы печи. Показано, что применение тонких приемов изменения распределения шихты в сложившихся условиях может обеспечить ощутимое увеличение степени использования восстановительной способности газов и уменьшение расхода кокса.

2. Поиск рационального распределения материалов на колошнике путем последовательного приближения к лучшим показателям плавки осложнен необходимостью преодоления ошибок и при больших затратах времени не всегда эффективен. Необходимо использовать знания о влиянии распределения материалов на колошнике на структуру столба шихты и ход тепло–массообменных процессов по высоте печи в различных радиальных зонах. Последнее требует моделирования процессов для формирования технологических решений.

3. Разработаны методика, алгоритм и программа расчета материально–энергетических балансов в 10 радиальных кольцевых зонах (РКЗ) по высоте доменной печи, впервые позволившие давать количественную

оценку влияния распределения шихтовых материалов по радиусу печи на ход процессов по высоте и показатели доменной плавки. Новый подход открыл дополнительные возможности анализа процессов и разработки мер по повышению эффективности плавки, включающие: выявление лимитирующей зоны по высоте и поперечному сечению печи и установление влияния распределения материалов по радиусу печи на теплопотери, а также влияния всех технологических факторов на расход кокса с учетом изменения теплопотерь, что в известных методиках не предусмотрено; количественный учет повышенной тепловой нагрузки на газовый поток в периферийной зоне (за счет теплопотерь) при определении возможной рудной нагрузки в этой зоне; учет перетоков газа на разных горизонтах из одних РКЗ в другие, влияющих на процессы тепло- и массопередачи с оценкой развития степени прямого восстановления в кольцевых сечениях по радиусу печи.

4. На основе разработанной методики на данном этапе аналитических исследований установлены следующие новые закономерности: минимальное развитие процесса прямого восстановления и соответствующего теплопотребления на этот процесс при всех условиях имеет место на периферии, несколько выше – в центре и в промежуточных зонах; указанная закономерность подтверждена экспериментально и отличается от ранее существовавших представлений; в большинстве случаев реального распределения шихты на колошнике существуют кольцевые сечения, в которых имеет место вырождение двухступенчатого теплообмена по высоте, что уменьшает устойчивость процессов и приводит к дополнительному расходу топлива; рациональное распределение материалов на колошнике при правильном выборе параметров осевой «отдушины» способствует уменьшению количества таких РКЗ, повышает устойчивость процессов и сокращает расход топлива.

5. Впервые дана количественная аналитическая оценка влияния конструкции загрузочных устройств (конусных – КЗУ, бесконусных – БЗУ), соответствующих возможностей улучшения распределения материалов на колошнике и уменьшения расхода кокса в доменной плавке. Показано, что при переходе от параболического распределения рудной нагрузки, характерного для КЗУ, к равномерному и близким к нему распределениям, характерным для БЗУ, экономия кокса составляет по результатам расчета учетом ожидаемого улучшения устойчивости процессов величину 4–5%, что подтверждено фактической величиной экономии на ДП №№ 5 (КЗУ) и 6 (БЗУ) Новолипецкого меткомбината.

6. Моделирование процессов при трех режимах плавки – ретроспективном, реальном и перспективном показало, что во всех рассмотренных режимах равномерное в РКЗ 4–9 распределение рудной нагрузки более эффективно по расходу топлива, чем фактическое, благодаря уменьшению количества РКЗ, в которых верхняя ступень теплообмена вырождается. Показана тенденция необходимости увеличения рудной нагрузки на

периферии по мере сокращения расхода кокса за счет технологических мероприятий.

7. Результаты расчетно–аналитического исследования по методике ИЧМ процессов по высоте и поперечному сечению доменной печи с использованием расчетно–экспериментальных данных о распределении материалов на колошнике позволили осуществить научно обоснованный выбор рациональных параметров загрузки на основе выявленных закономерностей развития процессов и количественной оценки их влияния на показатели плавки. Дальнейшее совершенствование параметров загрузки шихты будет выполняться путем установления рационального распределения величин рудных нагрузок в радиальных кольцевых зонах.

1. *Большаков В.И.* Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. – К.: Наукова думка.– 2007.– 411 с.
2. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. – Днепропетровск: «Пороги», 2003.– 596с.
3. *Познание процессов* доменной плавки /Коллективный труд под редакцией В.И.Большакова и И.Г.Товаровского. – Днепропетровск: «Пороги», 2006.– 439с.
4. *Большаков В.И.* Теория и практика загрузки доменных печей. – М.: Metallurgia. – 1990. – 256 с.
5. *Доменное производство «Криворожстали»* / Монография под редакцией В.И.Большакова. – 2004. – 377 с.
6. *Оптимизация программ* загрузки доменной печи лотковым распределителем /В.И.Большаков, В.Л.Покрышкин, Ф.М.Шутылев // Сталь. – 1985. – № 9. – С.16–20.
7. *Товаровский И.Г.,* Большаков В.И. Методика численного анализа процессов доменной плавки в радиальных кольцевых сечениях по высоте печи // Черные металлы.– 2006, март.– С.23–29.
8. *Товаровский И.Г.,* Большаков В.И. Аналитическое исследование параметров доменной плавки при неравномерном распределении рудной шихты и кокса по радиусу колошника // Черные металлы. – 2007, январь. – С.7–16.
9. *Товаровский И.Г.,* *Большаков В.И.* Аналитическое исследование влияния распределения рудных нагрузок на показатели плавки // Сталь. – 2006. – №10. – С.7–12.
10. *Товаровский И.Г.,* *Большаков В.И.,* *Шутылев Ф.М.* Выбор рациональных параметров распределения шихты на колошнике экспериментально–аналитическим методом // Черные металлы. – 2007, июнь. – С.13–19.
11. *Большаков В.И.,* *Шутылев Ф.М.,* *Товаровский И.Г.* Особенности применения различных загрузочных устройств на современных доменных печах // Бюллетень информации. Черная металлургия. – 2007. – №9. – С.24–32.
12. *Опыт* повышения степени использования восстановительных газов в доменных печах (по материалам межзаводской школы) /В.М.Федченко, Л.Я.Шпарбер, И.Г.Товаровский и др. // М.: «Черметинформация». – 1984. – 45с.