

И.Г.Товаровский

**ПОЗНАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ
НА ОСНОВЕ ИХ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Выполнено аналитическое исследование процессов доменной плавки на основе разработанной 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. Количественно уточнено влияние исходных параметров на конечные результаты, раскрыты внутренние связи процессов. Выявлены закономерности трансформации температурно–концентрационных, фазовых и газодинамических полей в объеме печи, а также поперечных потоков газа по высоте столба шихты.

математическая модель, процессы доменной плавки, трансформация температурных полей, технологический режим.

Постановка задачи. Среди методов познания явлений природы математическое моделирование занимает особое место. Оно позволяет глубже проникнуть в сущность явлений, лучше осмыслить взаимосвязи процессов и на этой основе формировать прогнозы. Плодотворность корректного использования математических методов в различных сферах научного познания отмечалась многими выдающимися учеными:

Тот, кто порочит высшую достоверность математики, тот питается сумбуrom. Леонардо да Винчи.

В каждой естественной науке заключено столько истины, сколько в ней есть математики. Иммануил Кант.

Математический формализм оказывает совершенно удивительную услугу в деле описания сложных вещей. Математика, как часто случается, была умнее, чем интерпретаторская мысль. М.Борн.

Если люди отказываются верить в простоту математики, то это только потому, что они не понимают всю сложность жизни. Джон фон Нейман.

При этом корректное использование математических методов осложнено необходимостью глубокого понимания предметной сущности изучаемых явлений, а также тонкостей математического аппарата и особенностей системного анализа процессов. Поскольку такой подход доступен не многим исследователям, ряд выдающихся ученых рассматривали проблему скептически, а иногда с иронией:

С тех пор, как за теорию относительности принялись математики, я ее уже сам больше не понимаю. Существует поразительная возможность овладеть предметом математически, не поняв существа дела. А.Эйнштейн.

Наиболее совершенной моделью кота является такой же кот, а лучше — он сам. Н.Винер

Наряду с математизацией знаний происходит и математизация глупостей; язык математики, как ни странно, оказывается пригодным для выполнения любой из этих задач. В.В.Налимов.

Некоторые высказывания выдающихся ученых проникнуты пониманием сложности и противоречивости математической интерпретации процессов, а также необходимости их содержательного анализа при использовании математических методов:

В математике нет символов для неясных мыслей. Жюль Анри Пуанкаре.

Всякая точная наука основывается на приближительности. Б.Рассел.

Пока математический закон отражает реальную действительность, он не точен; как только математический закон точен, он не отражает реальную действительность. Наши математические затруднения Бога не беспокоят. Он интегрирует эмпирически. А.Эйнштейн.

Таким образом, использование тонкого и эффективного инструмента познания процессов – математического моделирования требует, прежде всего, глубокого осмысления сущности изучаемых явлений и их формализации с применением удачно выбранного математического аппарата. Найденное численное решение задачи и форма представления результатов должны давать возможность предметного анализа не только выходных, но также промежуточных параметров и их связей. Учитывая принципиальную невозможность достижения полной адекватности модели реальному процессу (см., например, замечание Н.Винера выше), характер построения модели (например, модульный) должен предусматривать возможность её перестройки и дополнения по мере проверки адекватности реальным процессам в широком диапазоне режимов. Такой подход не всегда отвечает возможности применения классических методов моделирования и использования известных методов численного решения. Однако приоритетность этого подхода с позиций содержательной интерпретации результатов диктует необходимость изыскания нетрадиционных решений в части моделирования и нахождения численных результатов во имя сохранения предметности результатов (см. выше замечания А.Эйнштейна).

В области доменного производства математическое моделирование процессов занимает большое место. Выполненный анализ [1–3] показал, что адекватность моделей реальным процессам зависит, главным образом, от степени изученности процессов. Поскольку подстройка к реальным условиям по параметрам внутреннего состояния возможна лишь очень приблизительно (скорее качественно), ее производят по выходным параметрам (расход кокса, производительность, параметры чугуна, шлака и колошникового газа), что не позволяет дать однозначную оценку адекватности модели реальным процессам. Это вызывает необходимость ввода эмпирических коэффициентов, не являющихся константами, а скорее псевдоконстантами, содержательная основа которых не всегда однозначна. Несмот-

ря на указанные трудности, модели позволяют глубже осмысливать процессы и ставить задачи дальнейшего изучения.

Использование результатов экспериментальных исследований доменных печей при обобщении теоретических знаний о процессах позволило значительно продвинуть разработку комплексной модели доменной плавки, причем наиболее существенные результаты получены японскими и российскими разработчиками [4–6]. Полученные результаты иллюстрируют возможности широкого использования моделей для анализа реальных технологий и разработки новых технологических решений. Однако до настоящего времени такого масштабного анализа ни для одной модели не проведено. Причины этого обусловлены не только трудностями переосмысления всей технологии как цельной системы, но также и тем, что требуется специфическое построение моделей для удобства оперирования ими в ходе аналитических исследований.

Поставив перед собой задачу преодоления указанных трудностей, автор настоящей статьи с сотрудниками начали с создания собственной модели для выполнения аналитических исследований процессов доменной плавки. При наличии моделей, ранее созданных другими специалистами, создание своей было обусловлено, помимо прочего, необходимостью её соответствия требованиям системности параметрического анализа показателей и процессов, в том числе адекватности одновременного отражения по возможности всех процессов и показателей по всем параметрам [3]. Только при использовании такой модели возможно выявление ряда закономерностей, традиционно выпадающих из внимания исследователей и остающихся за пределами анализа. Указанные закономерности после проверки на реальных объектах могут служить основанием для углубления выводов и разработки новых технологических решений.

Особенности модели и методики исследования. Разработанная в ИЧМ НАН Украины математическая модель [2,3], отличается 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. Наряду с количественным уточнением связей исходных параметров и конечных результатов (расход кокса, производительность), раскрываются внутренние связи процессов в объеме печи (в том числе некоторые новые), влияющие на характер режимов плавки и конечные результаты. Наряду с балансовыми факторами экономии кокса, определяющими основную величину сокращения теплопотребления, расчетами учитывается и оценивается существенное влияние на расход кокса характера теплообмена, фазовых превращений, газомеханики и распределения материалов и газов в печи, связанных прямыми и обратными связями с расходом кокса.

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), задаваемым программой загрузки и вычисляемым 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 межзатомного 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.

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.

С помощью разработанной модели выполнили комплексное аналитическое исследование процессов доменной плавки, включающее многовариантные расчеты показателей процессов при варьировании в широком диапазоне реальных значений параметров шихты и дутья, а также распределения материалов на колошнике.

Базой для расчетов были характеристики и показатели плавки доменной печи (ДП) № 9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» в один из характерных периодов работы. На рис.1–5 приводится численно–графическая иллюстрация результатов, на основе которых выполнен приводимый ниже многомерный анализ процессов и режимов плавки [3].

Влияние неравномерности распределения материалов по радиусу ДП на ход процессов. Неравномерное распределение материалов и газов в 12–ти вертикальных температурных зонах (ВТЗ) по высоте и 10–ти радиальных кольцевых зонах (РКЗ) по радиусу доменной печи определяет соответствующую неравномерность хода процессов и полиморфность температурно–концентрационных, фазовых и газодинамических полей печного объема. При этом для РКЗ с высокой фактической рудной нагрузкой (ФРН) характерно вырождение верхней ступени теплообмена и повышенное развитие прямого восстановления, приводящие к дефициту теплоты в высокотемпературных ВТЗ, и соответствующее возрастание общей потребности теплоты и расхода кокса.

На рис.1 отображаются изменения разности температур газа и шихты по высоте столба шихты, а 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 расположенных ниже горизонтах создается дефицит теплоты, который должен компенсироваться высокотемпературной теплотой этих зон при увеличении высоты низкотемпературных зон. Перераспределение РН по радиусу ослабляет этот процесс и способствует общему улучшению теплопередачи с уменьшением средней температуры на колошнике. Идеальным является переход к равномерному в РКЗ–2–9 распределению рудных нагрузок – РРН, с установлением рациональных РН в РКЗ–1 (центр) и РКЗ–10 (периферия).

Большое влияние на формирование газопотоков и температурно–концентрационных полей оказывают процессы в зоне размягчения и плавления (ЗРП). На рис.2 приводятся расчетные параметры ЗРП и доли газа от общего количества на разных горизонтах по высоте при вариантах прихода $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=0$ (левый график) и $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=15$ кг/т (правый график) [3,с.68–78]. В первом случае ЗРП расположена на уровнях верха и низа заплечиков в периферийной зоне, низа шахты – в промежуточных зонах и середины шахты – в осевой зоне.

Фактическое распределение РН

Равномерное распределение РН

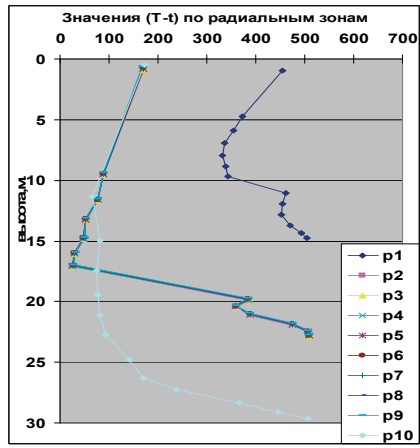
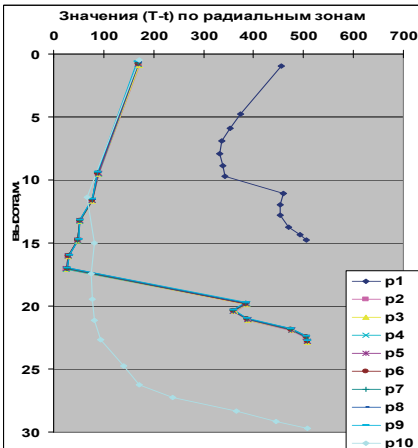
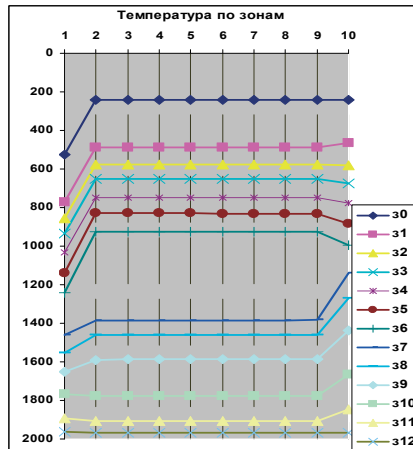
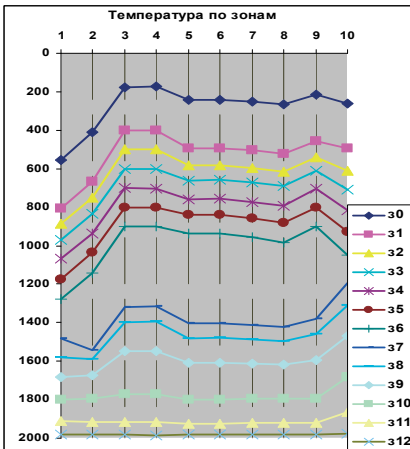
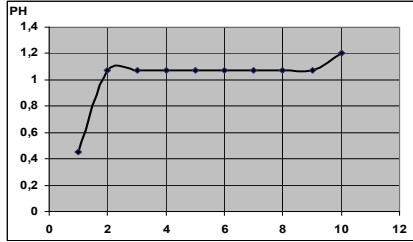
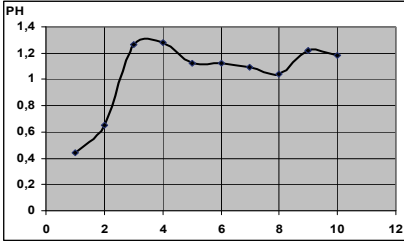


Рис.1. Температуры газа (по вертикали – средние рис.) и разность температур шихты и газа (по горизонтали– нижние рис) по радиусу ДП №9 ПАО «АМКР» при двух способах распределения относительной рудной нагрузки РН (по вертикали– верхние рис.); по горизонталям (верхние и средние рис.) – №№ РКЗ.

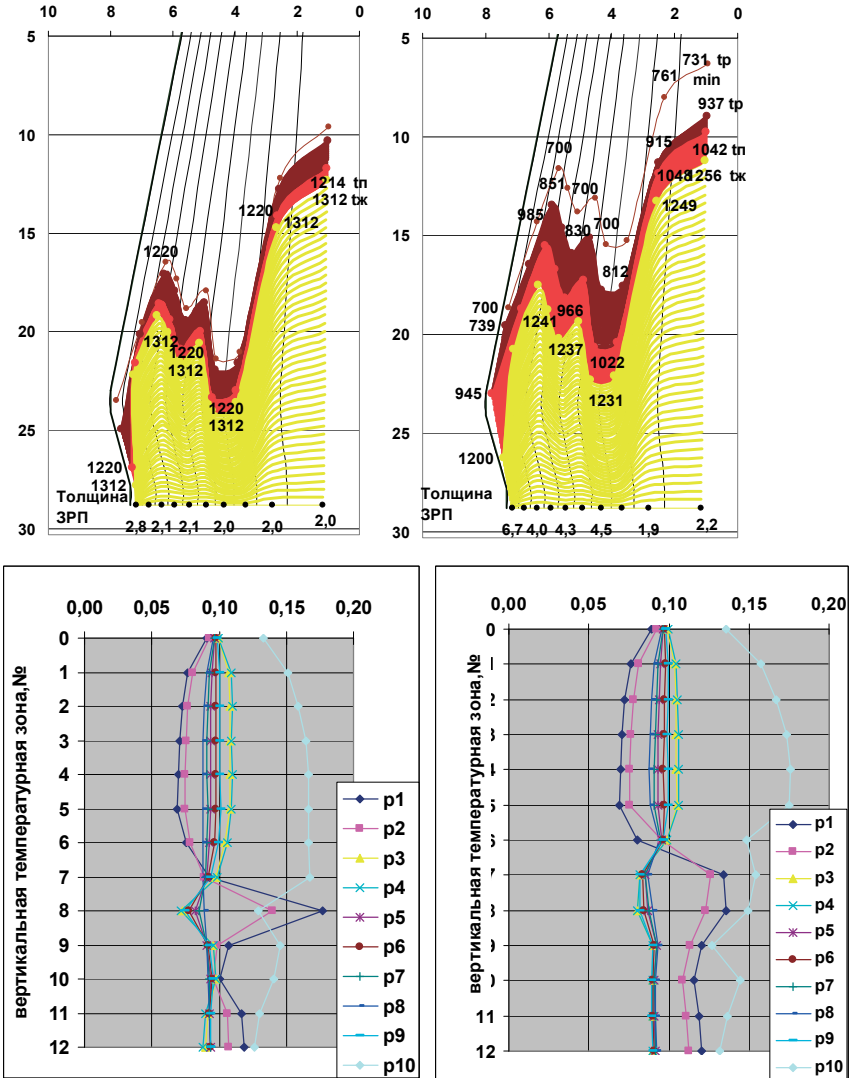


Рис.2. Конфигурация ЗРП (верхние графики) и доли газа от общего количества (по горизонтали) в радиальных кольцевых зонах (p1...p10) по высоте ДП №9 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» в случаях прихода $K_2O+Na_2O=0$ (слева) и 15 кг/т (справа).

На верхних графиках: по горизонтали – расстояние от оси печи, по вертикали – расстояние от верха печи, м.; tp, tn, tk – температуры начала размягчения, плавления и оживания шихты соответственно, $^{\circ}\text{C}$.

Наибольшая толщина ЗРП (от начала размягчения до начала полного ожигения) 2,8 м – у периферии, далее 2,0–2,1 м. вплоть до оси. Из рис.2 следует, что под ЗРП идет поперечный переток газа к периферии, оси и приосевой РКЗ–2, а выше – обратный переток. Поток газа «обтекает» ЗРП через «отдушины». Аналогичный механизм движения газа наблюдается и при $K_2O+Na_2O=15$ (правый график) с тем различием, что толщина ЗРП у периферии увеличивается до 6,7 м, а в промежуточных РКЗ – до 4,0–4,6 м. при перемещении всей ЗРП вверх на 2–3 м. Указанная деформация ЗРП приводит к рассредоточению перетоков газа по высоте и сокращению твердофазной зоны. Последнее способствует уменьшению степени использования энергии газов и возрастанию расхода топлива.

Достижение РРН требует улучшения металлургических свойств сырья и кокса, а также развития осевой «отдушины» с загрузкой к оси кокса повышенного качества при максимально–возможной РН у периферии. Такое распределение РН в РКЗ–2–9 при заданных РН у оси и периферии приводит к сокращению толщины ЗРП и увеличению объема твердофазной зоны, что способствует уменьшению температуры колошникового газа, степени прямого восстановления и тепловых потерь. Температурное поле печи изменяется в направлении смещения центральных изотерм в верхние горизонты печи, а промежуточных и периферийных – в нижние.

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.

Изучение физико–химического механизма формирования степени прямого восстановления показало, что максимальное развитие прямого восстановления часто имеет место в РКЗ–1 (центральная) и составляет 30–50% при средней для печи 20–40%; минимальное достигается в РКЗ–10 (периферийная) и составляет 3–15%. 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 [3, с.54–62]. Это положительно влияет на расход топлива не только непосредственно через уменьшение общей степени прямого восстановления, но и через перераспределение (выравнивание) теплопотребности между РКЗ–2–9. Сокращение теплопотерь печи при выравнивании распределения РН в решающей мере зависит от величин РН на периферии.

Органически присущее конусным загрузочным устройствам (КЗУ) параболическое распределение рудной нагрузки характерно повышенными значениями РН в 2–3–х промежуточных РКЗ и существенно отличает-

ся от распределения РН при загрузке бесконусными (лотковыми) устройствами (БЗУ), обеспечивающими более равномерное распределение РН. Это позволило на основе изложенного подхода впервые оценить расчетным путем (с помощью модели) ожидаемое сокращение расхода кокса при использовании БЗУ вместо КЗУ [3, с.90–94]. Оно составляет, по меньшей мере, 4% и соответствует результатам практического использования БЗУ и КЗУ.

Влияние шихтовых и дутьевых параметров на формирование температурно–концентрационных полей ДП.

Выполненное аналитическое исследование влияния входных параметров плавки на формирование температурно–концентрационных и фазовых полей ДП показало существенные количественные отличия для разных параметров: наиболее сильным оказалось влияние предварительной металлизации шихты, расходов природного (коковского) газа, кислорода и температуры дутья; другие параметры влияют слабее.

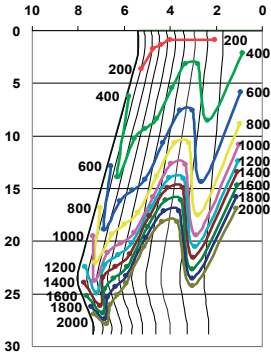
Предварительно металлизированная шихта

При замене части окисленной шихты предварительно металлизированной основным фактором экономии кокса является сокращение теплотребления на прямое восстановление железа. При степени предварительной металлизации до 20% величины экономии кокса на каждый дополнительный 1% металлизации составляет 0,25–0,55%, а прирост производительности – до 0,4%. Они близки к известным экспериментальным и расчетным балансовым значениям и зависят от исходной степени прямого восстановления. При возрастании степени предварительной металлизации до 30% экономия кокса уменьшается вдвое. По мере увеличения степени предварительной металлизации шихты сокращается теплотребление на прямое восстановление железа и соответственно уменьшается отношение теплоемкостей шихты и газа, а также интенсивность теплопередачи в нижней зоне. Вследствие этого увеличивается потребная для нагрева продуктов плавки высота нижней ступени теплообмена и соответственно сокращается высота верхней при увеличении минимальной по высоте разности температур шихты и газа. В результате изотермы газа перемещаются вверх, увеличивая потери через колошник, а зона размягчения и плавления располагается выше базового положения и утолщается. Под действием указанных явлений основной балансовый фактор экономии кокса от использования предварительно металлизированной шихты не может быть реализован достаточно полно при степени металлизации более 20%, т.к. процессы тепломассообмена, фазовых превращений и газомеханики развиваются в направлении, ограничивающем эффективность реализации этой технологии.

Выполненные расчеты показали, что отношение теплоемкостей потоков шихты и газа в ВТЗ–7 (900–1000⁰С) достигает 4,34, а в варианте с металлизацией шихты до 30–55% оно уменьшается до 1,578. Такое сокращение величины отношения и соответственно интенсивности теплообмена приводит к перемещению высоких температур газа в верхние горизонты столба и повышению температуры колошниковога газа, что и наблюдается на рис.3.

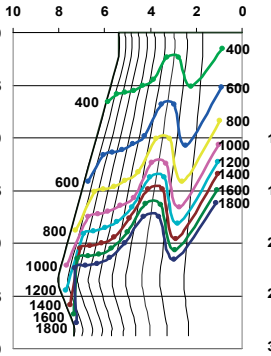
Fe мет 10% ФРН

Температура газов : T, °C



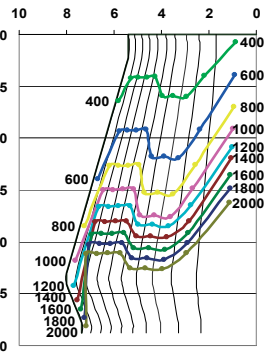
Fe мет 30% ФРН

Температура газов : T, °C

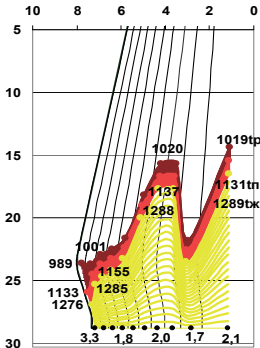


Fe мет 30% РРН

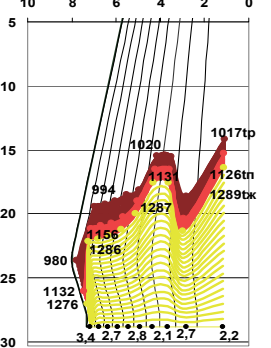
Температура газов : T, °C



Fe мет 10% ФРН



Fe мет 30% ФРН



Fe мет 30% РРН

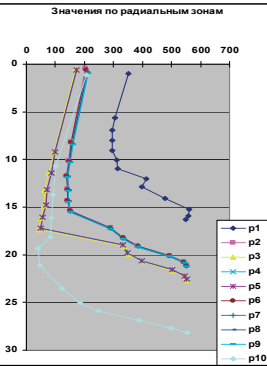
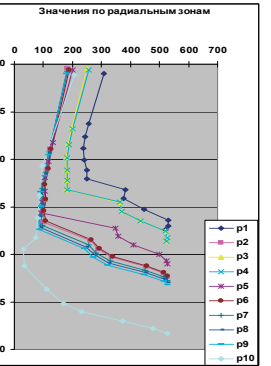
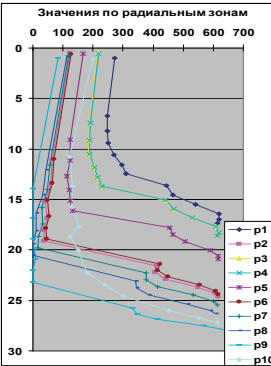
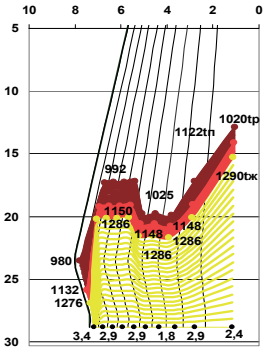


Рис.3. Изотермы газа (верхние графики),ЗРП (средние графики) и разность температур газа и шихты T-t (нижние графики) в объеме ДП-9 ПАО «АМКР» (РКЗ р1-р10)

При этом, как следует из рисунка, в большинстве РКЗ увеличивается потребная для нагрева продуктов плавки высота нижней ступени теплообмена и соответственно сокращается высота верхней при увеличении минимальной по высоте разности температур шихты и газа. В соответствии с перемещением изотерм происходит и смещение вверх ЗРП и, при заданных свойствах материалов, также увеличение её толщины. Важнейшей характеристикой классической доменной плавки является двухступенчатая схема теплообмена по высоте, обусловленная наличием в средней части столба зоны сильного внутреннего теплопотребления, которая отделяет верхнюю зону интенсивного теплообмена с отношением теплоемкостей потоков шихты и газа $m_B = (W_{ш}/W_r) < 1$ от нижней зоны интенсивного теплообмена с отношением теплоемкостей потоков шихты и газа $m_H = (W_{ш}/W_r) > 1$. Основным фактором внутреннего теплопотребления шихты является развитие прямого восстановления железа. Чем оно больше, тем интенсивнее теплообмен в нижней зоне. Однако по мере увеличения степени предварительной металлизации шихты объем развития прямого восстановления сокращается, и интенсивность теплообмена уменьшается. Происходит постепенная трансформация присущей доменной плавке схемы теплообмена в направлении схемы, присущей вагранке [3, с.109–117].

Специфической особенностью технологии доменной плавки с применением предварительно металлизированного сырья является ослабление влияния распределения материалов на колошнике на показатели плавки, а также резкое сокращение эффективности (часто нецелесообразность) вдувания восстановительных газов, обусловленная сокращением объема прямого восстановления.

Природный газ (ПГ)

По мере увеличения расхода ПГ сокращается теплопотребление на прямое восстановление железа и соответственно уменьшается отношение теплоемкостей шихты и газа, а также интенсивность теплопередачи в нижней зоне при увеличении её в верхней зоне. Вследствие этого увеличивается высота нижней ступени теплообмена и соответственно сокращается высота верхней. В результате изотермы газа и шихты перемещаются вверх, увеличивая потери через колошник, а зона размягчения и плавления располагается выше базового положения и утолщается. Уменьшение температур газа в нижней зоне способствует сокращению общих тепловых потерь. Под действием указанных факторов, не учитываемых при балансовых расчетах, изменение дифференциального эквивалента замещения кокса (ДЭЗ) при увеличении расхода ПГ изменяется не столь плавно: в диапазоне до $100 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна, он сокращается равномерно – на $0,1\%/м^3$ от исходной величины $1,0\text{--}0,9 \text{ кг}/\text{м}^3$. При дальнейшем увеличении расхода ПГ и сокращении степени прямого восстановления до $r_d < 20\%$ происходит резкое увеличение температуры колошниковога газа, приводящее к сокращению ДЭЗ в $1,5\text{--}4$ раза. Переход к более равномерному РРН в РКЗ–

2–9 ослабляет падение ДЭЗ в области $ПГ > 100 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна, увеличивая эффективность.

Температурное поле газового потока в объеме печи при увеличении расхода ПГ деформируется в направлении уменьшения температур нижней и увеличения температур верхней зон T (рис.4). При этом во всех РКЗ существенно уменьшается разность температур газа и шихты $T-t$ в нижней зоне (ВТЗ–7–12) и увеличивается аналогичная величина по высоте верхней зоны (ВТЗ–1–6). Одновременно происходит уменьшение отношения теплоемкостей потоков шихты и газа m в зоне прямого восстановления от 3–5 до 1,5–2 за счет сокращения средней степени прямого восстановления от 35–40% до $r_d < 20\%$, а в периферийной зоне и некоторых РКЗ с малой рудной нагрузкой – до малозначительных величин.

Уменьшение величин $T-t$ и m в нижней зоне приводят к уменьшению интенсивности теплообмена в этой зоне, а увеличение $T-t$ в верхней зоне – к увеличению интенсивности теплообмена в ней. В результате этого в большинстве РКЗ увеличивается высота нижней и сокращается высота верхней ступеней теплообмена, причем общая высота (сверху) прогрева материалов до заданных температур уменьшается. В соответствии с перемещением изотерм происходит и смещение вверх ЗРП (рис.4) и, при заданных свойствах материалов, увеличение её толщины. Наблюдается также некоторое увеличение температур начала размягчения и плавления, обусловленное сокращением количества монооксида железа в первичных шлаках, которое способствует смещению ЗРП вниз. Однако величина этого смещения значительно меньше, чем от перемещения изотерм вверх.

Уменьшение температур газа в нижней зоне способствует сокращению тепловых потерь значительно большему, чем их увеличение в верхней зоне, где температуры газа увеличиваются. В результате общие тепловые потери сокращаются.

Таким образом, направление деформации температурного поля газового потока при увеличении расхода ПГ аналогично его деформации при использовании предварительно металлизированной шихты, где происходит постепенная трансформация присущей доменной плавке схемы теплообмена в направлении схемы, присущей вагранке (см. выше) [3, с.145–156].

Температура дутья

По мере увеличения температуры дутья (T_d) при ФРН происходит сокращение расхода кокса (Δk) и увеличение производительности ($\Delta П$), отличающиеся для разных условий, в том числе разных расходах природного газа (ПГ) и содержания кислорода в дутье ($\%O_2$). В пределах каждого варианта условий с увеличением T_d величины Δk и $\Delta П$ плавно сокращаются в 1,5–2 раза; большие значения Δk относятся к варианту атмосферного дутья с $ПГ=100 \text{ м}^3/\text{т}$ ($0,7 \div 0,2, \%/10^\circ$), меньшие – к варианту кислородного дутья ($\%O_2=30\%$, $ПГ=100 \text{ м}^3/\text{т}$) ($0,4 \div 0,1, \%/10^\circ$).

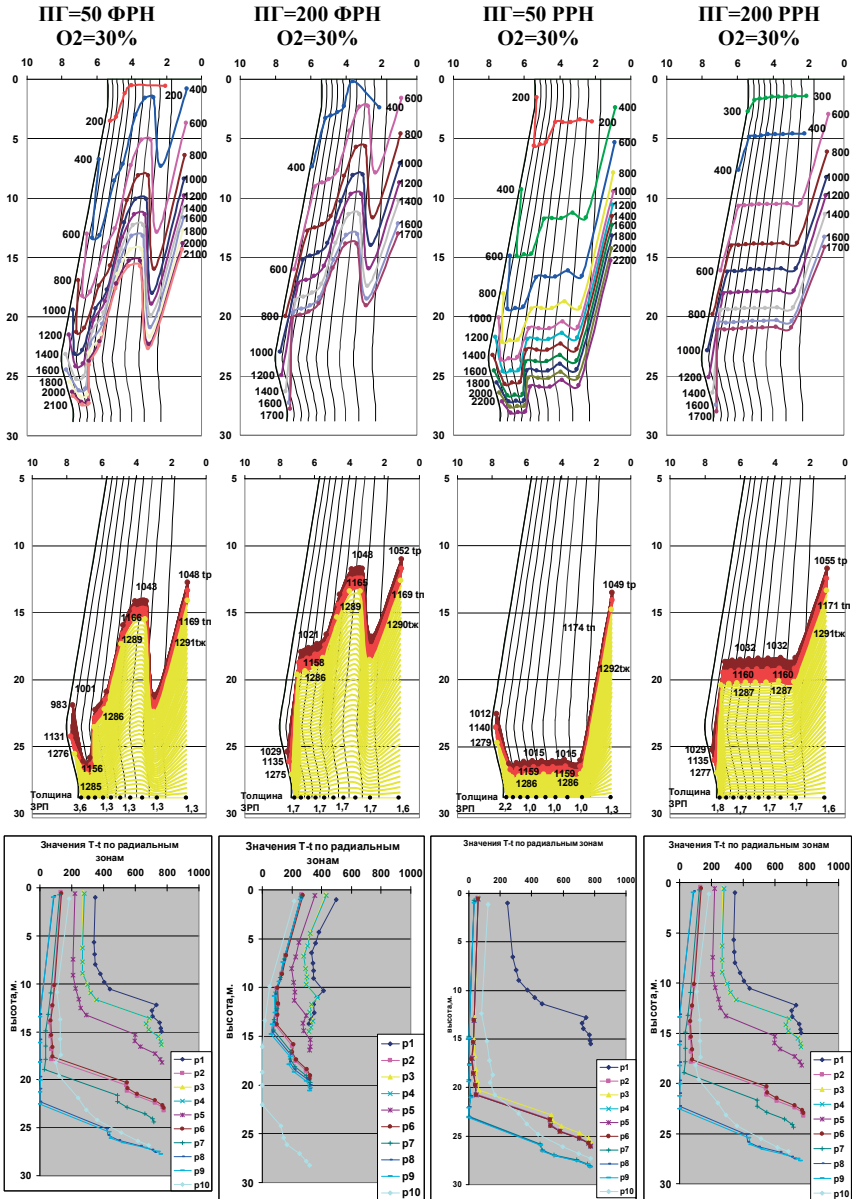


Рис.4. Изотермы газа (верхние графики), ЗРП (средние графики) и разность температур газа и шихты T-t (нижние графики) в объеме ДП-9 ПАО «АМКР» (РКЗ р1-р10) при разном расходе ПГ и 30% O₂ в дутье.

Одним из факторов сокращения величин Δk и $\Delta \Pi$ при увеличении T_d является замедление уменьшения температуры колошникового газа (t_k). При этом выявлено, что область минимальных значений t_k соответствует диапазону значений теоретической температуры горения $\sim 2000\text{--}2200^\circ\text{C}$. В случае отсутствия ПГ сохранение наибольшей эффективности нагрева дутья возможно при вдувании коксового газа. При загрузке шихты с получением на колошнике РРН величины экономии кокса и прироста производительности от нагрева дутья на 10–20% (отн.) меньше, чем при ФРН, вследствие достижения высокой средней степени использования энергии газов и соответственно большего приближения к предельным термохимическим условиям плавки. Особенности переноса теплоты в столбе шихты при увеличении T_d следующие [3, с.127–137]:

- в случае ФРН в нижних высокотемпературных зонах ВТЗ–8–12 через более проницаемые РКЗ с низкой рудной нагрузкой проходит больше газа (по массе), чем через менее проницаемые РКЗ с высокой рудной нагрузкой, что вследствие меньшего охлаждения газа в первых и увеличения его объема относительно вторых стимулирует переток газа из первых во вторые через коксовые слои и способствует поддержанию интенсивности теплопередачи в зоне умеренных температур на уровне, обеспечивающем уменьшение t_k при увеличении T_d ; в случае обогащения дутья кислородом интенсивность перетоков уменьшается, что приводит к увеличению t_k при высоких концентрациях кислорода;

- в нижней части печи при ФРН появляются дополнительные высокотемпературные изотермы газа, а перемещение изотерм происходит в зависимости от газопроницаемости: изотермы шихты и газа высоконагруженных малопроницаемых РКЗ перемещаются вниз, увеличивая область умеренных температур в шахте, а изотермы низконагруженных высокопроницаемых РКЗ перемещаются вверх, что способствует замедлению снижения t_k ;

- разность температур газа и шихты увеличивается при ФРН во всех РКЗ снизу и в низконагруженных – сверху, а уменьшается – в высоконагруженных РКЗ сверху;

- применение РРН приводит к перемещению всех изотерм шихты и газа вниз с расширением области умеренных температур в шахте;

- указанный характер перемещения изотерм присущ вариантам на атмосферном и обогащенном кислородом до 30% дутье, однако во втором случае высокотемпературные изотермы расположены выше, чем в первом, а большинство значений разностей температур газа и шихты увеличиваются и смещаются вверх, что определяет и более высокую температуру колошникового газа в первом случае.

Кислород

Для анализа хода процессов в объеме печи результаты расчетов [3, с.169–178] представлены графически и дополнены численными значениями интенсивности теплопередачи (градусов на 1м высоты при ФРН),

характеризуемой скоростью нагрева шихты от температуры загрузки до 900°C – $\text{CH}_{<900}$ и от 900 до 1300°C – $\text{CH}_{>900}$, а также охлаждения газа от начальной температуры в горне до 1000°C – $\text{ИТ}_{>1000}$ и от 1000 до 400°C – $\text{ИТ}_{<1000}$ для РКЗ с высокой и низкой рудной нагрузкой (вн, нн):

Из приводимых графиков (рис.5) и численных данных следует, что при увеличении концентрации кислорода в дутье от 21 до 30% при $\text{ПГ}=100 \text{ м}^3/\text{т}$ и ФРН наблюдаются следующие изменения:

Вар–г РКЗ	Кислород 21%, ПГ = 100 м ³ /т					Кислород 30%, ПГ = 100 м ³ /т				
	10	9–вн	2–вн	3–нн	1–нн	10	9–вн	2–вн	3–нн	1–нн
$\text{CH}_{<900}$	39,1	36,4	38,4	70,0	78,6	38,8	37,2	46,3	72,4	78,6
$\text{CH}_{>900}$	75,5	93,0	81,6	100,0	105,3	75,5	83,3	80,0	108,1	114,3
$\text{ИТ}_{<1000}$	48	61	61	67	74	45	59	55,5	69	74
$\text{ИТ}_{>1000}$	151	200	178	151	145	172	217	192	170	164

– в высокотемпературных зонах интенсивность передачи теплоты от газа к шихте ($\text{ИТ}_{>1000}$) увеличивается во всех РКЗ, а скорость нагрева шихты ($\text{CH}_{>900}$) увеличивается только в РКЗ с низкой рудной нагрузкой, но уменьшается в РКЗ с высокой рудной нагрузкой (в варианте с температурой дутья 200°C – не изменяется);

– в низкотемпературных зонах интенсивность передачи теплоты от газа к шихте ($\text{ИТ}_{<1000}$) увеличивается в РКЗ с низкой рудной нагрузкой и уменьшается в РКЗ с высокой рудной нагрузкой, а скорость нагрева шихты ($\text{CH}_{<900}$) увеличивается во всех низкотемпературных РКЗ;

– большая часть изотерм шихты и газа перемещаются вверх, за исключением низкотемпературных ($<900^{\circ}\text{C}$) периферийных (РКЗ–10) изотерм шихты, которые смещаются вниз с расширением низкотемпературной области в этой зоне; вверх перемещается и значения разностей температур газа и шихты.

Рассмотренные особенности переноса теплоты в значительной мере определяются распределением газа по радиусу печи и его перетоками на разных горизонтах. Из результатов расчетов следует, что в нижних высокотемпературных зонах ВТЗ–8–12 через более проницаемые РКЗ–1,3–5 с низкой рудной нагрузкой проходит больше газа (по массе), чем через менее проницаемые РКЗ–2,6–9 с высокой рудной нагрузкой. В ходе теплоотдачи в столбе шихты газ в РКЗ–1,3–5 (нн) охлаждается меньше, чем в РКЗ–2,6–9 (вн), а температура его становится выше, чем в РКЗ–2,6–9. Соответственно увеличивается и объем газа в РКЗ–1,3–5 относительно РКЗ–2,6–9, что стимулирует переток газа из первых во вторые через коксовые слои, которые проницаемее, чем рудные, в 5–6 раз, иногда на порядок. В результате в верхних низкотемпературных зонах (ВТЗ–1–6) масса газа в РКЗ–2,6–9 (вн) увеличивается, а в РКЗ–1,3–5 (нн) уменьшается. Такая «подпитка» газом малопроницаемых РКЗ через коксовые слои способствует улучшению теплопередачи в верхних ВТЗ в целом, но лишь частично

компенсирует несовершенство теплопередачи из-за неравномерности распределения материалов.

Кислород 21%

Кислород 30%

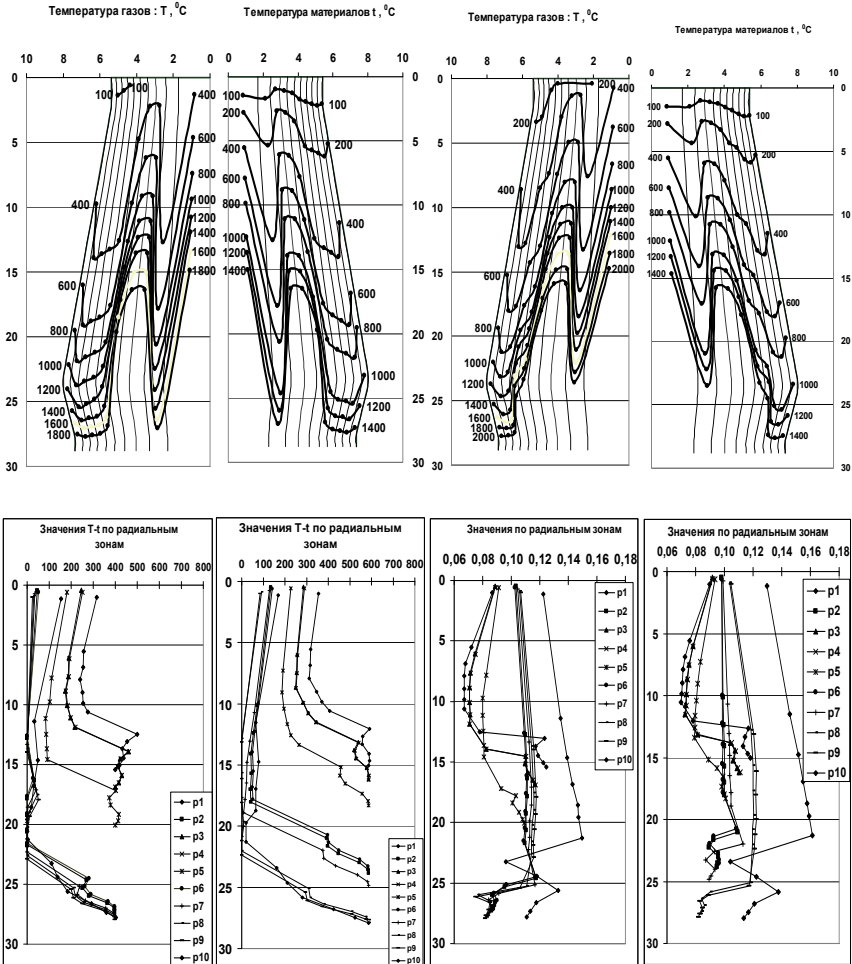


Рис.5. Распределение температур газа ($T, ^\circ\text{C}$) и шихты ($t, ^\circ\text{C}$) в объеме ДП-9 ПАО «АМКР» при разном содержании кислорода в дутье (верхние графики): по горизонтали – расстояние от оси печи, по вертикали – расстояние от верха (технологического нуля), м. Распределение по высоте разности температур между газом и шихтой ($T-t$) и долей массы газа в разных РКЗ (p1–p10) (нижние графики)

Таким образом, с увеличением содержания кислорода в дутье ($\%O_2$) в нижней части печи образуются дополнительные высокотемпературные изотермы газа, а большая часть изотерм, а также разность температур газа и шихты перемещаются вверх. Лишь низкотемпературные изотермы шихты у периферии при ФРН и все периферийные и центральные изотермы шихты и газа при РРН смещаются вниз, расширяя низкотемпературную область в этих зонах. Существенное расширение низкотемпературной области в шахте наблюдается также при $T_d=200^{\circ}C$. ЗРП смещается вверх в малозагруженных РКЗ и вниз в высокозагруженных при некотором увеличении её толщины, причем эта тенденция ослабевает по мере увеличения T_d и расхода ПГ; при $ПГ \geq 100 \text{ м}^3/\text{т}$ она становится малозначительной, а при РРН – незначительной. Под влиянием указанных процессов t_k в большинстве режимов с повышением $\%O_2$ увеличивается или не изменяется и несколько уменьшается лишь при низких T_d . Поскольку величина γ_d также существенно не уменьшается при росте концентрации восстановителей и сокращении времени пребывания шихты в печи, а удельные потери теплоты изменяются незначительно, преобладающим фактором теплового баланса оказывается сокращения прихода теплоты с дутьем при выводе части азота. В результате, в отличие от ряда балансовых расчетов, где предполагается сокращение γ_d и уменьшение t_k , прирост производительности при увеличении $\%O_2$ оказался меньше ($0,9 \div 2,7$ против $1,0 \div 3,0\%$), а перерасход кокса больше ($0,5 \div 1,45$ против $0,1 \div 0,5\%$).

Предельные условия доменной плавки.

На основе выполненного параметрического анализа сформированы условия комплексного использования лучших параметров плавки и выполнено аналитическое исследование показателей и процессов доменной плавки с позиций максимального сокращения расхода кокса за счет его замещения ПУТ (250 кг/т) и коксовым газом ($100 \text{ м}^3/\text{т}$) с увеличением T_d до $1300^{\circ}C$ и концентрации в нем кислорода 25% при содержании железа в полностью офлюсованной шихте до 60% и необходимом улучшении металлургических свойств кокса и сырья, а также оптимизации распределения материалов на колошнике [3, с.184–191]. Расчетами установлена возможность сокращения расхода кокса в указанном режиме до $190 \div 200 \text{ кг/т}$ чугуна. С учетом реализации рационального распределения рудных нагрузок на колошнике в этом режиме наблюдается тенденция к вырождению верхней ступени теплообмена в РКЗ–2–10, которая поддается торможению добавкой коксового газа. При этом достигаются предельные величины степени использования энергии газов. ЗРП смещается вниз при сохранении периферийной части (РКЗ–10) в области заплечиков, а центральной (РКЗ–1) – в области середины–верха шахты.

Высокоэффективная технология вдувания ПУТ не может быть единственной в отрасли в связи с дефицитом высокосортных углей и динамичной конъюнктурой рынка. Её расширение должно сопровождаться разработкой дополняющих и альтернативных технологий, в частности со-

четания с вдуванием коксового газа, продуктов газификации низкосортных углей широкого назначения и др., а также загрузкой специально подготовленного кускового антрацита. Фундаментальное решение проблемы сокращения расхода кокса до $180 \div 200$ кг/т чугуна с использованием для его замещения низкосортных углей может быть получено на основе разработки новой технологии доменной плавки с вдуванием горячих восстановительных газов – продуктов газификации углей, получаемых в специальных газификаторах – прифурменных (на доменной печи) и придоменных (в отдельных агрегатах) [2].

Закономерности процессов тепломассообмена и фазовых превращений материалов.

Выполненные аналитические исследования позволили выявить и уточнить некоторые закономерности хода процессов, ряд которых качественно подтверждены ранее проведенными экспериментальными исследованиями и могут быть использованы для совершенствования технологии и дальнейшего изучения процессов доменной плавки. Основные из них следующие:

1. Наличие среди общего количества радиальных кольцевых зон (РКЗ) с различным характером теплообмена по высоте, отдельных ЗРП, в которых имеет место трансформация двухступенчатой схемы теплообмена в сторону одноступенчатой. Это обусловлено неизбежным в реальных условиях противотока образованием радиальной и окружной неравномерности распределения материалов и газов с формированием в поперечном сечении разнообразных по величине отношения теплоемкостей потоков шихты и газа элементов. Трансформация характерна для двух случаев:

– при увеличении отношения теплоемкостей потоков шихты и газа в верхней зоне до величины, близкой к 1, с вырождением верхней ступени теплообмена (например, при глубоком обогащении дутья кислородом);

– при уменьшении отношения теплоемкостей потоков шихты и газа (стремлении к 1) в нижней зоне за счет сокращения теплотребления на прямое восстановление и диссоциацию карбонатов с частичным вырождением нижней ступени теплообмена (например, при использовании предварительно металлизированного сырья).

2. Минимальное развитие процесса прямого восстановления железа на периферии, наиболее высокое – в зонах с максимальной рудной нагрузкой, иногда в центре печи. Результат определяется влиянием комплекса факторов, в том числе количеством восстановительных газов ($\text{CO} + \text{H}_2$) на единицу кислорода шихты, долей твердого углерода в столбе и высотой зоны температур шихты $>900^\circ\text{C}$ в данной РКЗ. Преобладающее влияние первого фактора в периферийной РКЗ определяет сильное развитие здесь косвенного восстановления и слабое – прямого. В центральной РКЗ указанное влияние тормозится большими долей твердого углерода в столбе и высотой зоны температур шихты $>900^\circ\text{C}$.

3. Перетоки газа в радиальном направлении на разных горизонтах, связанные с изменением сопротивления слоев шихты и параметров газового потока в ходе фильтрации через столб. Возможность перетоков обусловлена слоевой структурой столба шихты, в которой слои кокса в 5–6 раз проницаемее слоев железорудной шихты, а в некоторых зонах – на порядок и более. При этом в нижних высокотемпературных зонах ВТЗ–8–12 через более проницаемые РКЗ с низкой рудной нагрузкой проходит больше газа (по массе), чем через менее проницаемые РКЗ с высокой рудной нагрузкой, а в ходе теплоотдачи в столбе шихты газ в первых охлаждается меньше, чем во вторых, температура его становится выше, а объем больше, что стимулирует переток газа из первых во вторые через коксовые слои. Такая «подпитка» газом малопроницаемых РКЗ через коксовые слои лишь частично компенсирует несовершенство теплопередачи из-за неравномерности распределения материалов. Несколько специфичен механизм перетоков в вязко–пластической области. Здесь под ЗРП идет поперечный переток газа к периферии, оси и приосевой РКЗ–2, а выше – обратный переток. Поток газа «обтекает» ЗРП через «отдушины».

4. Сложная система прямых и обратных связей параметров зоны размягчения и плавления (ЗРП) с комплексом входных, промежуточных и выходных параметров доменной плавки:

- положение и конфигурация ЗРП зависит от распределения материалов на колошнике, их физико–химических свойств и степени восстановления, характера температурного поля печи и интенсивности отбора теплоты у стен;

- параметры образуемой ЗРП влияют на распределение газопотоков и основных процессов в объеме печи, а также на выходные параметры плавки и формирование управляющих параметров.

Конечные значения параметров образованной ЗРП зависят от целевых установок управления.

5. Сложная система прямых и обратных связей потерь теплоты через стены печи с комплексом входных, промежуточных и выходных параметров доменной плавки:

- величина потерь зависит не только от конструкции системы охлаждения, но также от распределения материалов и газов в поперечном сечении печи, распределения температур по высоте столба шихты и др.

- полученная величина тепловых потерь через стенки печи существенно влияет на тепловую работу периферийной зоны, характер теплообмена в ней и во всей печи и, в конечном итоге на расход кокса при всех режимах плавки.

Конечные величины потерь теплоты определяются целевыми установками управления.

Выявление рассмотренных и других возможных закономерностей основано на представлении процессов доменной плавки в виде комплекса полиморфных температурно–концентрационных, фазовых и газодинами-

ческих полей в объеме ДП, дискретизированных на 120 локальных объемов (12 по высоте и 10 радиальных), которые связаны между собой единой системой материально–теплого баланса с выявлением лимитирующего локального объема. Анализ процессов на такой основе позволяет избежать по меньшей мере системных ошибок, присущих известным подходам. Примером таких ошибок является использование для прогнозов выражений, в которых содержатся допущения о незначительной величине разности температур газа и шихты на границе двух зон теплообмена ($<10^\circ$) для печи в целом, либо использование приводящих к этому завышенных значений коэффициента теплопередачи. Сущность ошибок в следующем.

В основу теории теплообмена в доменной плавке заложена двухступенчатая схема теплообмена по высоте, обусловленная наличием в средней части столба зоны сильного внутреннего теплотребления, которая отделяет верхнюю зону интенсивного теплообмена с отношением теплоемкостей потоков шихты и газа $m_B=(W_{ш}/W_r)<1$ от нижней зоны интенсивного теплообмена с отношением теплоемкостей потоков шихты и газа $m_H=(W_{ш}/W_r)>1$. Основными факторами внутреннего теплотребления шихты являются развитие прямого восстановления железа и превращения карбонатов. Однако по мере сокращения расхода сырого флюса и степени прямого восстановления, а также при увеличении степени предварительной металлизации шихты с сокращением объема развития прямого восстановления, происходит уменьшение интенсивности теплообмена и соответственно увеличение разности температур газа и шихты на границе зон теплообмена с постепенной трансформацией присущей доменной плавке схемы теплообмена в направлении схемы, присущей вагранке [3, с.109–117]. Прогнозирование эффективности использования предварительно металлизированного сырья с помощью модели, в которой это не учитывается и постулируется значение разности температур газа и шихты на границе двух зон теплообмена $<10^\circ$ для печи в целом, дает искаженные результаты [7], которые при анализе данного фактора видны более отчетливо, чем для других факторов.

Выявленные закономерности трансформации температурно–концентрационных, фазовых и газодинамических полей в объеме ДП (п.п.1,2), а также поперечных перетоков газа по высоте столба шихты (п.3) позволяют объяснить ряд сложных явлений (см. выше) и могут рассматриваться как инструменты саморегулирования в большой системе «Доменная плавка» [2, с.681].

Установленная сложная система прямых и обратных связей параметров зоны размягчения и плавления (п.4), потерь теплоты через стены (п.5) с комплексом входных, промежуточных и выходных параметров доменной плавки является важным компонентом системного анализа плавки.

Дальнейшее изучение этой системы рассмотренным методом с дополнением новыми экспериментальными исследованиями позволит выявить

новые закономерности хода процессов и дополнительные её системные свойства.

Заключение. Выполнено аналитическое исследование процессов доменной плавки на основе разработанной в ИЧМ НАН Украины математической модели, представляющей процессы доменной плавки в виде комплекса полиморфных температурно–концентрационных, фазовых и газодинамических полей в объеме ДП, дискретизированных на 120 локальных объемов, которые связаны между собой единой системой материально–теплового баланса с выявлением лимитирующего локального объема. Указанный характер построения модели обусловлен необходимостью её соответствия требованиям системности параметрического анализа показателей и процессов, в том числе адекватности одновременного отражения по возможности всех процессов и показателей по всем параметрам.

Результаты исследования позволили количественно уточнить влияние исходных параметров на конечные результаты (расход кокса, производительность), а также раскрыть внутренние связи процессов в объеме печи (в том числе некоторые новые), влияющие на характер режимов и результаты плавки. Наряду с уточнением влияния балансовых факторов экономии кокса, определяющих основную величину сокращения теплопотребления, количественно оценено существенное влияние на расход кокса характера тепломассообмена, фазовых превращений, газомеханики и распределения материалов и газов в печи, связанных прямыми и обратными связями с расходом кокса.

В ходе исследований выявлены и уточнены некоторые закономерности протекания процессов, ряд которых качественно подтверждены ранее проведенными экспериментальными исследованиями. Выявленные закономерности трансформации температурно–концентрационных, фазовых и газодинамических полей в объеме ДП, а также поперечных перетоков газа по высоте столба шихты позволяют объяснить ряд сложных явлений и могут рассматриваться как инструменты саморегулирования в большой системе «Доменная плавка», а установленная сложная система прямых и обратных связей параметров зоны размягчения и плавления, а также потеря теплоты через стены с комплексом входных, промежуточных и выходных параметров доменной плавки является важным компонентом системного анализа плавки.

Дальнейшее изучение этой системы рассмотренным методом с дополнением новыми экспериментальными исследованиями позволит выявить новые закономерности хода процессов и дополнительные её системные свойства, которые могут быть использованы для совершенствования технологии.

1. *Товаровский И.Г.* Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом / И.Г. Товаровский, Е.И. Райх, К.К. Шкодин, В.А. Улахович. – М.: Металлургия, 1978. – 204с.
2. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. Монография. 2-е издание. – Днепропетровск: изд. «Пороги», 2009. – 768с.
3. *Товаровский И.Г., Большаков В.И., Меркулов А.Е.* Аналитическое исследование процессов доменной плавки. Монография. – Днепропетровск: изд. «Экономика», 2011. – 206с.
4. *Blast furnace Phenomena and modelling* / Ed. By Yasuo Omori. Elsevier applied science. – London and New York, 1987.– 631p.
5. *Дмитриев А.Н., Шаврин С.В.* Двумерная математическая модель доменного процесса // Сталь.– 1996.– № 12.– С.7–13.
6. *Дмитриев А.Н.* Развитие и применение теории газодинамики, тепло– и массообмена для решения практических задач доменного производства на основе комплекса математических моделей // Познание процессов доменной плавки. Коллективный труд под редакцией В.И. Большакова, И.Г. Товаровского. Днепропетровск: «Пороги», 2006.– С.207–226.
7. *Мойкин В.И., Боквиюк Б.А., Бабушкин Н.М.* Теплотехнический анализ работы доменной печи на металлизированной шихте методом математического моделирования // Сталь.– 1978.–№ 11.– С.982–986.

*Статья рекомендована к печати
канд.техн.наук Н.М.Можаренко*

Й.Г.Товаровський

Пізнання процесів доменної плавки на основі їхнього математичного моделювання

Виконано аналітичне дослідження процесів доменної плавки на основі розробленої багатозонної математичної моделі, що включає 120 локальних об'ємів, пов'язаних між собою єдиною системою матеріально-теплого балансу, та відповідає вимогам системності аналізу і адекватності одночасного відображення всіх процесів по всім параметрам. Кількісно уточнено вплив вихідних параметрів на кінцеві результати, розкриті внутрішні зв'язки процесів. Виявлено закономірності трансформації температурно-концентраційних, фазових і газодинамічних полів в об'ємі печі, а також поперечних перетоків газу по висоті стовпа шихти.