

И.Г. Товаровский**ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА РАБОТЫ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ И
АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ**

Разработана аналитическая система для подготовки первичной информации работы доменных печей, расчета комплексных показателей с учетом влияния погрешностей учета и прогноз показателей на основе двухзонного теплового баланса с переменной температурной границей зон. Разработанная многозонная модель хода процессов в объеме печи позволяет прогнозировать показатели плавки с раскрытием состояния процессов по высоте и поперечному сечению печи.

Ведущая роль Института черной металлургии (ИЧМ) в области доменного производства определила в качестве одного из главных направлений работ института анализ и обобщение опыта работы доменных печей СССР, инициатором и организатором которого был академик З.И.Некрасов. Систематические работы в этом направлении начались с организацией специальной лаборатории в 1967 году, для работы в которой были привлечены специалисты, сочетающие аналитические способности и производственный опыт. Руководителем этих работ с 1968 до 1978 год был академик З.И.Некрасов, с 1982 до 1995 год – д.т.н. И.Г.Товаровский.

Система анализа и обобщения

Ежегодные отчеты Института включали анализ состояния производства, технологии и реализации новых технических решений с формированием рекомендаций по развитию производства чугуна в отрасли и на отдельных предприятиях. Их содержание систематически рассматривалось руководством Минчермета СССР, а рекомендации были основой для формирования технической политики в отрасли. Структура ежегодного отчета включала:

- анализ состояния производства чугуна, железорудного сырья и кокса на предприятиях и в отрасли;
- оценку состояния агрегатов и оборудования, включая аварии, неполадки и ход выполнения ремонтов; специально – анализ эксплуатации загрузочных устройств;
- сравнительный анализ показателей доменной плавки с выявлением возможностей их улучшения на каждом предприятии и в отрасли;
- оценку уровня организации технологии, контроля параметров плавки и достоверности технологического учета;
- анализ испытания и реализации новых технологических и технических решений с оценкой их эффективности;

- обзор состояния доменного производства и реализации новых технологических и технических решений на зарубежных предприятиях;
- анализ состояния различных направлений совершенствования технологии доменной плавки в отрасли (ежегодно – одно, в том числе: подготовка сырья, комбинированное дутье, управление процессами и др.);
- анализ результатов выполнения НИР и ОКР на предприятиях и их реализации;
- рекомендации для отдельных предприятий и отрасли.

Выполнение рассмотренного объема работ потребовало привлечения широкого круга специалистов отрасли, включая НИИ, проектные организации, предприятия и руководящие органы. На разных стадиях выполнения в работе принимали участие ДонНИИЧермет, Урал НИИЧМ, ЦНИИЧермет, Укргипромет, УХИН, ВНИИМТ, ТулаНИИЧермет, НПО «Черметмеханизация», ДМетИ (теперь НМетАУ), ЗИИ (теперь ЗГИА). Координацию работы, обеспечение единого методического подхода с формированием окончательных выводов и рекомендаций, а также представление и защиту работы осуществлял Институт черной металлургии.

Сотрудники лаборатории участвовали в работе отраслевых совещаний и комиссий по основным техническим решениям развития доменного производства, а также в разработке целевых отраслевых программ, таких, как «Снижение расхода кокса на выплавку чугуна» и др. Лабораторией разработаны важнейшие отраслевые руководящие документы, не потерявшие значимость до настоящего времени:

- методика и нормативы оценки влияния технологических факторов на расход кокса и производительность доменных печей;
- методика и нормативы оценки величин отходов и потерь железа при производстве чугуна, агломерата и окатышей;
- методика оценки эффективности использования систем автоматизированного управления доменной плавкой;
- типовая технологическая инструкция по доменному производству.

Работа лаборатории квалифицировалась как одна из важнейших НИР и оценивалась долей от общего экономического эффекта, полученного в отрасли.

Деятельность по анализу и обобщению опыта работы доменных печей востребована специалистами и в настоящее время, однако в сложившихся условиях не представляется возможным определить постоянного заказчика работ.

Аналитические исследования доменной плавки

В ходе сопоставительного анализа работы доменных печей возникали вопросы оценки влияния различных факторов на наблюдаемые изменения расхода кокса и производительности и вклада этих факторов в общую ве-

личину изменений. При этом установлено не всегда однозначное влияние технологических факторов и существенная зависимость этой неоднозначности от величин погрешностей технологического учета. Оказалось, что величина влияния погрешностей технологического учета иногда сопоставима с влиянием технологических факторов. Для оценки достоверности установления влияния технологических факторов на фактически наблюдаемые изменения производительности, расходов кокса и железорудных материалов потребовалась разработка специальной методики, основанной на анализе материально–тепловых балансов. Сущность методики заключается в следующем.

Для каждого анализируемого периода производят расчеты балансов железа, шлакообразующих и газифицированных элементов (углерода, кислорода, азота, водорода) с определением невязок балансов. В измеряемые исходные параметры вносят поправки, которые обращают в нуль невязки балансов. Из множества величин поправок наиболее вероятной причиной невязки является тот параметр, для которого предполагаемая величина погрешности ближе всего к допустимой погрешности его измерения. Во многих случаях возможно установление роли погрешностей и выделение влияния технологических факторов. В других случаях это затруднительно, но необходимо для исключения ошибочных решений.

Подробно методика и ход её совершенствования изложены в работах [1–3]. Она предназначена для решения широкого круга задач по анализу показателей доменной плавки. Исходными данными для расчета являются все отчетные показатели работы доменной печи. В результате расчета на ЭВМ выдаются развернутые материально–тепловые балансы, расчетные показатели восстановительной и тепловой работы печи, а также газодинамики процесса. Для каждого показателя выдаются три значения: «истинное», максимально– и минимально–возможное при данной общей величине невязки баланса. Сравнивая значения какого–либо показателя для двух различных печей или разных периодов работы одной печи, вполне определенные выводы можно сделать лишь в том случае, когда при различии «истинных» значений нет наложения «зон нечувствительности». Если последние накладываются друг на друга, то вывод может быть только вероятностным (при небольшом наложении зон), либо не вполне определенным (при большом наложении зон). В ряде случаев приходится констатировать невозможность сделать определенные выводы при существующих погрешностях исходных данных. Для получения достоверных выводов в таких случаях требуется увеличить число периодов (испытаний).

Для расширения возможностей расчетного анализа реальной технологии доменной плавки потребовалось дополнить рассмотренную выше методику модулем прогноза показателей при изменениях параметров и условий плавки. С этой целью разработана методика и алгоритм прогнозной оценки, которые могут быть использованы как в общем комплексе авто-

матризированной системы анализа (АСА) реальной технологии, так и автономно. Особенностью методики является определение расхода углерода и кокса на основе двухзонного теплового баланса с переменным значением граничной температуры зон, зависящим от условий плавки. Для установления указанного переменного значения граничной температуры зон в систему уравнений теплового баланса введены уравнения теплопередачи по высоте столба шихты. Такой подход способствовал раскрытию «механизма» изменений и увеличил прогнозные возможности методики.

Выполненные с помощью методики оценки реальной технологии и прогнозной методики аналитические исследования позволили оценить влияние ряда важнейших технологических факторов на расход кокса и производительность доменных печей и определить перспективы совершенствования технологии [1–3].

Система учета и анализа показателей

Для повышения эффективности функционирования отраслевой системы анализа работы доменных печей разработана методика машинной обработки и предварительного анализа показателей доменной плавки, которая реализована на ЭВМ в виде автоматизированной системы анализа (АСА) работы доменных печей.

Задачей разработки АСА было повышение оперативности, достоверности и глубины анализа показателей доменной плавки на основе обработки поступающей с заданной дискретностью первичной информации. При этом предполагается использование первичной информации трех уровней: 1) среднесуточной, систематически формируемой в цехах по каждой доменной печи; 2) среднемесячной, формируемой в виде технических отчетов; 3) среднегодовой, формируемой на основе месячных технических отчетов.

Первая может быть использована непосредственно на предприятии путем накопления на магнитных носителях с последующим усреднением за период требуемой длительности, определением расчетных характеристик для сравнительного анализа с целью принятия оперативных решений. На основе этого вида информации, на ЭВМ могут формироваться месячные, годовые технические отчеты и любые требуемые формы инженерной документации. Вторая и третья формы информации могут использоваться не только на предприятии, но за его пределами для сравнительного анализа работы доменных печей различных предприятий. Накопление этой информации на магнитных носителях за длительный период позволяет выполнять ретроспективный анализ работы с выявлением тенденций, причин изменений и выработкой мер по повышению эффективности доменной плавки в отдельных агрегатах и на предприятии.

Важнейшим фактором, определяющим достоверность результатов анализа показателей доменной плавки, является организация технологического учета. Основными недостатками существующей системы учета показателей работы доменных печей являются:

- отсутствие единых научно обоснованных норм формирования, обработки и представления информации о работе доменных печей и цехов, что приводит, в частности, к различию методов усреднения параметров, разным полноте и форме представления отчетных данных на предприятиях;
- недостаточные полнота и точность информации о процессах в доменных печах и состоянии оборудования;
- высокая роль субъективного фактора при формировании отчетных показателей работы доменных печей.

С целью повышения достоверности технологического учета и его унификации разработана единая методика обработки и форма представления технических показателей работы доменных цехов, ориентированная на использование ЭВМ и включающая регламентацию источников получения, объема, точности, периодичности, а также характера обработки и представления информации о работе доменных печей и вспомогательных агрегатов доменного цеха.

Помимо первичной информации о работе доменных печей для повышения качества выполнения анализа требуется расчет комплексных показателей и материально–тепловых балансов, методикой обработки первичной информации предусмотрено выполнение следующих расчетов: комплексных параметров дутьевого режима; балансов железа и шлакообразующих элементов; баланса газифицированных элементов; теплового баланса; восстановительно–тепловых и газодинамических характеристик. Важным компонентом анализа является оценка влияния погрешностей исходных данных на расчетные характеристики процесса. С этой целью предусмотрена коррекция параметров в соответствии с величинами невязок балансов с последующим анализом расчетных величин (см. выше).

Методикой предусмотрен также анализ влияния факторов на удельный расход кокса и производительность доменных печей. Указанный анализ выполняется с целью сравнения работы доменных печей или периодов работы одной печи при условно одинаковых параметрах плавки с выявлением роли неконтролируемых или неизвестных факторов. Для отсева влияния известных факторов используются выражения, полученные на основе расчетно–аналитических исследований и скорректированные по обобщенным данным практики. АСА включает следующие компоненты:

- – базу первичных технологических показателей работы доменных печей (суточные, месячные, годовые, отдельные периоды), характеристик агрегатов и исходных материалов;
- – программу компоновки и усреднения первичной информации (по печам, цехам, периодам);
- – программу расчета комплексных показателей и материально–тепловых балансов с анализом невязок балансов и погрешностей учета;

- – программу формирования различных видов представления результатов обработки, их накопления и передачи в другие программы.

Система открыта и может быть легко дополнена другими программами на имеющейся информационной базе, которая также может расширяться.

При достаточной полноте исходной информации возможно непрерывное изучение связей основных показателей плавки и расчетных характеристик с целью выявления тенденций и закономерностей их изменения на отдельных печах, группах печей и в отрасли с последующим формированием рекомендаций по совершенствованию технической политики в области доменного производства [1–3].

Таким образом, ретроспективное изучение показателей доменного производства является смысловой основой прогнозирования и планирования перспектив его развития. Результаты обработки показателей доменной плавки в АСА являются также информационной базой для решения задачи оптимизации направлений развития доменной плавки.

Использование разработанной системы в практике анализа доменной плавки основано на сочетании формализованных методов обработки и сопоставления показателей с неформальными приемами анализа, учитывающими недостаточную полноту и однозначность исходной информации. Такое сочетание является неотъемлемым элементом системного анализа. Указанный анализ должен выполняться непрерывно в силу специфических особенностей доменной плавки как большой системы, содержащей неконтролируемые элементы. Эти элементы обуславливают неуправляемый дрейф параметров, который необходимо прослеживать для принятия корректных решений по управлению плавкой.

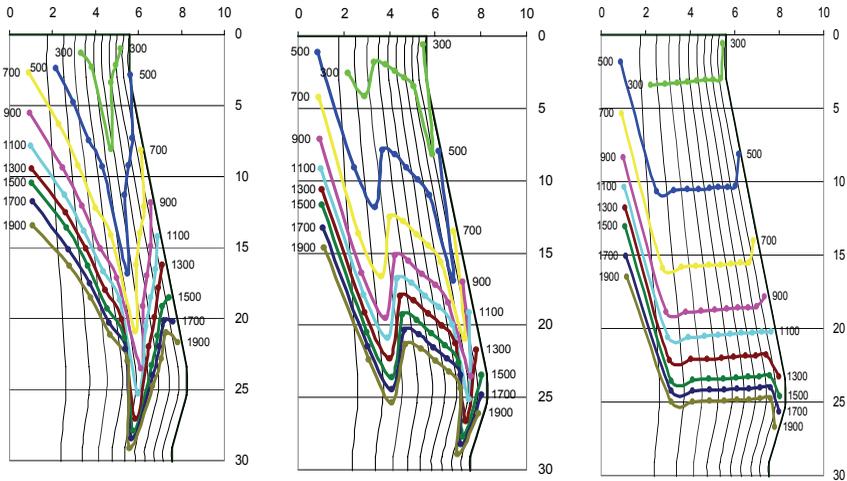
Моделирование хода процессов в объеме печи

В последние годы система анализа дополнена разрабатываемой в Институте многозонной моделью хода процессов в объеме печи. Разработанная модель предназначена для создания возможности количественного анализа процессов доменной плавки в радиальных кольцевых сечениях по высоте печи при заданном распределении материалов на колошнике [4–6]. На рисунке приведен пример результатов расчета для доменной печи объемом 5500 м^3 . Аналитические исследования на такой основе позволили выявить ряд новых закономерностей хода процессов в объеме печи и возможности их использования для совершенствования технологии [4–6].

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

Равновеликие по горизонтальной площади вертикальные 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.



Конусный режим загрузки (Параболическое распределение) Лотковый режим загрузки (Фактическое распределение) Лотковый режим загрузки (Равномерное в РКЗ–2–9 распределение)

Рисунок. Температура газов (у кривых, гр.С) в печном пространстве при трех способах загрузки шихты

В соответствии с разной газопроницаемостью кольцевых зон 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-теплового 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 вычисляя 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 $\alpha_v = A \cdot \sqrt[3]{\Delta P}$ (Вт/(м³·°К)) (A – константа). Величина α_v подставляется затем в выражение для определения времени пребывания материалов в зоне $\tau = q / \{\alpha_v \cdot [(VR)_i^j + (VK)_i^j] \cdot (T - t)\}$, сек. Для установления указанной формы выражения величины α_v , зависящей от многих факторов, было предпринято специальное аналитическое исследование.

Распределение материалов в радиальных кольцевых зонах рассчитывается по исходным данным на верхней границе загрузки шихты (ВТЗ–0), включающим:

1. 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 $\Delta_1 + \Delta_2 + \dots + \Delta_{10} = 1$.

2. Насыпные объемы железорудной шихты и кокса, определяемые в прогнозе $(VR) = R_\Sigma / (\gamma_R)$; $(VK) = K / (\gamma_K)$; м³/т чг

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.

Принятые способы задания рудных нагрузок на колошнике охватывают практически все возможные варианты загрузки как конусными, так и бесконусными загрузочными устройствами (КЗУ и БЗУ).

Отличительной особенностью разработанной модели по сравнению с известными является содержательное единство общих и зональных характеристик плавки, что определяет ее высокие прогнозные возможности.

Заключение

Одним из главных направлений работы Института черной металлургии был анализ и обобщение опыта работы доменных печей. В рамках этого направления выполнен ряд методических разработок и создана аналитическая система, включающая подготовку первичной информации, расчет комплексных показателей с учетом влияния погрешностей учета и прогноз показателей на основе двухзонного теплового баланса с переменной температурной границей зон. Разработанная многозонная модель хода процессов в объеме печи позволяет прогнозировать показатели плавки с раскрытием состояния процессов по высоте и поперечному сечению печи.

1. *Товаровский И.Г.* Совершенствование и оптимизация параметров доменного процесса. – М.: Металлургия, 1987. – 192 с.
2. *Товаровский И.Г.* Доменная плавка. Эволюция, ход процессов, проблемы и перспективы. – Днепропетровск: Пороги, 2003. – 596 с.
3. *Товаровский И.Г.* Системный анализ показателей доменной плавки // В книге «Познание процессов доменной плавки». Коллективный труд. Под редакцией В.И. Большакова и И.Г. Товаровского. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – С.296–321.
4. *Товаровский И.Г., Большаков В.И.* Аналитическое исследование влияния распределения рудных нагрузок на показатели плавки // *Сталь*, 2006. – №10. – С.7–12.
5. *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.
6. *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.

*Статья рекомендована к печати чл.–корр.НАН Украины
В.И.Большаковым*