

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

БУГАЕВ КОНСТАНТИН МИХАЙЛОВИЧ

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И РАБОТА ГАЗА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ
И ПУТИ ИХ УЛУЧШЕНИЯ**

Специальность 05.16.02-Металлургия черных металлов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Донецк, 1996

369. 1/1. 8



00754299 (-)

Диссертация представлена в виде рукописи.

Работа выполнена в Донецком научно-исследовательском институте черной металлургии Министерства промышленности Украины

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор ЯРОШЕВСКИЙ
Станислав Львович
- доктор технических наук, профессор ТАРАСОВ
Владимир Петрович
- доктор технических наук, профессор ТОВАРОВСКИЙ
Иосиф Григорьевич

Ведущее предприятие - Мариупольский металлургический комбинат "Азовсталь"

Защита состоится "21" марта 1996 г. в 12 часов на заседании специализированного совета Д.06.04.03 в Донецком государственном техническом университете по адресу: 34060, г.Донецк, ул.Артема, 58

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан "20" февраля 1996 г.

Ученый секретарь
специализированного совета Д.06.04.03

доктор технических наук

С.М.Сафьяни

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Выплавка чугуна относится к числу наиболее энергоемких производств, основные затраты в котором приходятся на кокс. Его удельный расход зависит как от внешних условий плавки, так и совершенства ее организации - в первую очередь от эффективности взаимодействия встречных потоков газа и шихты. Внешние условия определялись проводившейся в отрасли технической политикой, ориентированной последние 30-35 лет на развитие экстенсивных технологий и вместе с тем в значительной мере игнорировавшей необходимость улучшения качества шихты, в первую очередь - агломерата, без которого высокоэффективная организация и ведение доменной плавки невозможны. Такая техническая политика обуславливалась не только нацеленностью производства в основном на высокие валовые показатели, но и недостаточной разработанностью теории процессов доменной плавки. К наиболее важным из них относятся массо- и теплообмен между газами и шихтой, ход и результаты которых определяют удельный расход кокса. Теория этих процессов из-за отсутствия данных о распределении газов по радиусу доменной печи пока разработана лишь для идеализированного условного однородного противотока с равномерным радиальным распределением шихты и газа и не может адекватно отражать реальные процессы, протекающие в реальном неоднородном противотоке. Поэтому экспериментальные и теоретические исследования реальных процессов массо- и теплообмена, проходящих в различных вертикальных кольцевых сечениях печи, являются актуальной задачей, от решения которой зависят дальнейшее развитие теории и совершенствование технологии доменной плавки, методов ее расчета и управления процессом.

Тема диссертации непосредственно связана с планами научно-исследовательских работ Донничермета по доменному производству. Базовыми для подготовки диссертации явились работы из этих планов с номерами госрегистрации 68011711, 69009708, 70015619, 73042889, 01860018874, 01880033687, 01890034939, 01931005564, 01931028988, 01934015052 и другие, выполнявшиеся под научным руководством и при непосредственном участии соискателя.

Цель работы - определение факторов, оказывающих главное влияние на формирование и распределение потока газов, ход и результаты его восстановительной и тепловой работы, определение наиболее эффективных способов снижения расхода кокса.

Идея работы заключалась в том, чтобы на основе экспериментальных данных о составе и температуре газа, распределении и составе шихтовых материалов на шести горизонтах доменной печи, а также достоверных данных о распределении газа, полученных специально разработанным методом, рассчитать ход восстановления и теплообмена по высоте отдельных кольцевых сечений и таким образом впервые получить и затем исследовать единую картину взаимосвязанных реальных процессов во всем объеме доменной печи.

Методы исследования. Помимо традиционных методов, использовавшихся при измерении температуры в доменной печи, отборе из нее проб газа и шихты, их химическом и петрографическом анализе, при измерении температуры чугуна и шлака, были разработаны оригинальные, в том числе на уровне изобретения, методы исследования.

1. Взаимодействие дутья и природного газа впервые изучалось во всем объеме фурмы с помощью специального оборудования и зондов.

2. Распределение природного газа и продуктов его горения в горне, включая водные пары, определялось путем индикации природного газа радиоактивным криптоном.

3. Измерение расхода дутья через фурмы проводилось неохлаждаемыми напорными трубками с салыниковым компенсатором.

4. Данные о радиальном распределении газа получены двумя методами: инструментальным — путем индикации газа в шахте радиоактивным криптоном, а также расчетным — по изменению окисленности шихты и газа в зоне косвенного восстановления.

5. Для расчета параметров массо- и теплообмена во всем объеме печи разработан метод реконструкции хода процессов, в общем заключающийся в расчетах распределения газа и многозонных материальных и тепловых балансов, впервые выполненных отдельно по кольцевым сечениям и сопряженных с общими балансами.

Основные научные положения, выносимые на защиту.

1. Неравномерность окружного распределения газов в горне проявляется в доменных печах не на ограниченной высоте — до 1,5 радиусов горна, как в холодных моделях, а вплоть до колошника.

2. Теплоемкость потока газов изменяется не равномерно по высоте печи, как общепринято, а значительно уменьшается при температурах 1300–700 °С — в зоне интенсивного восстановления.

3. Температура на границе ступеней теплообмена не постоянна, поскольку определяется не началом прямого восстановления при 850–900 °С, как принимали в теории, а соотношением массопотоков

газа и шихты и поэтому может изменяться в широком диапазоне от 650 до 1100 °С.

4. Степень прямого восстановления железа определяется не столько общим выходом фурменных газов, как общепринято, сколько количеством газа, проходящего через плохопроницаемые бечения гребня, где сосредоточена основная масса железорудного материала.

5. Удельный расход кокса при прочих равных условиях зависит от степени равномерности распределения газов, определяемой градулометрическим составом агломерата.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов работы в общем подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных во всех периодах исследований, а также тем, что рассчитанные при реконструкции хода процессов параметры: степень восстановления железа по высоте сечений, общий состав колошникового газа и другие — удовлетворительно соответствуют или совпадают с фактическими, определенными экспериментально.

Научное значение работы.

1. Впервые анализируется не ход процессов в условном однородном противотоке, а ход реальных процессов в реальном — с неравномерным газораспределением — неоднородном противотоке, который отличает ряд свойственных только ему закономерностей и особенностей. Важнейшая из них относится к одному из центральных вопросов теории доменного процесса — развитию прямого восстановления. Установлено, что степень его развития определяется не столько общим выходом газов (восстановителей), как общепринято, сколько степенью равномерности их распределения. Этот вывод существенно меняет направление поисков способов подавления прямого восстановления, оказывающего определяющее влияние на расход кокса.

2. Новые научные положения о снижении кажущейся теплоемкости газов в зоне интенсивного восстановления, о непостоянстве температуры на границе ступеней теплообмена и ее зависимости от соотношения массопотоков газа и шихты развивают теорию доменного процесса и позволили, в частности, существенно уточнить температурно-тепловую диаграмму и общую схему теплообмена в доменной печи, отражающие самые общие закономерности доменного процесса.

3. Современная теория пока не разработала способов количественного учета радиального распределения газов. Между тем в работе показано, что именно оно при прочих равных условиях опре-

делает ход и результаты доменной плавки. Таким образом, разработка вопросов, связанных с газораспределением, имеет первостепенное значение для теории и практики.

4. В работе доказана верность вызывавшего споры основного положения теории теплообмена Б.И. Китаева о близости температур газа и шихты на границе ступеней теплообмена.

Практическое значение работы.

1. Разработаны новые, в том числе на уровне изобретения, методики и средства контроля хода процессов.

2. Разработаны защищенные авторскими свидетельствами способы улучшения сгорания дополнительных топлив и дутья, интенсификации процессов в гребне, стабилизации теплового режима плавки, активизации теплообмена в фурменских очагах, повышения газопроницаемости столба шихты, позволяющие снижать расход кокса.

3. Разработаны эффективные режимы плавки на комбинированном дутье, впервые разработаны технологии плавки с совместной подачей природного газа и мазута и плавки на коксе и агломерате уменьшенной крупности, обеспечивающие снижение расхода кокса.

4. Впервые обоснована необходимость интенсивного осевого потока газов на мощных доменных печах, разработаны методы эффективного управления газовым потоком одновременно сверху и снизу.

5. Разработан метод расчетного определения распределения газов и метод реконструкции хода процессов. Внесены уточнения в методы расчетов зональных балансов, в кинетико-математические модели, повышающие достоверность результатов расчетов.

6. Определены близкие к фактическим, по нашему мнению, значения коэффициентов теплопередачи (от 0,5 до 1,2 кВт/К.м³), сведения о которых в различных публикациях отличаются на порядок.

7. Технологическим и экономическим анализом, впервые выполненным на народнохозяйственном уровне, обоснована необходимость улучшения гранулометрического состава агломерата — наиболее выгодного и единственного энергосберегающего, из всех значительных, способа снижения расхода кокса.

Реализация выводов и рекомендаций работы.

1. Разработанные методы и технические средства контроля и управления процессом плавки внедрены или использовались при выполнении работ прикладного плана, в том числе освоении технологии плавки на самой мощной в то время в мире доменной печи объемом 2300 м³, при ликвидации хронического одностороннего хода и

нормализации работы доменной печи объемом 5000 м³ и в других.

2. Экономически выгодные режимы комбинированного дутья с высокими расходами природного газа при умеренном обогащении дутья кислородом освоены и использовались до 1993 г. на большинстве металлургических предприятий Донбасса.

3. Технология выплавки чугуна с одновременной подачей в горн природного газа и мазута (или одного мазута) была освоена и в течение 70-х годов использовалась в большинстве доменных цехов Украины.

4. Способ классификации шихтовых материалов и технические средства для его реализации в 1989-1992 гг. внедрены на 36 доменных печах Украины и на Ново-Липецком комбинате.

Учетный до 1991 г. экономический эффект от внедрения результатов работы в ценах до 1991 г. составляет 10,2 млн.руб. (доля автора 2,1 млн.руб.). Отраслевое внедрение способа классификации шихтовых материалов по данным, утвержденным министерством промышленности Украины, позволило в период 1992-1994 гг. увеличить количество скипового кокса в доменном производстве Украины в среднем на 160 тыс. тонн в год и скипового агломерата - на 440 тыс. тонн без увеличения их товарного производства.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены на всесоюзных конференциях "Теория и практика современного доменного производства" (Днепропетровск, 1983 г.), "Работа фурменной зоны доменных печей" (газодинамика, теплообмен, массообмен)", (Свердловск, 1985 г.), "Процессы теплообмена в доменных печах" (Нариуполь, 1986 г.), "Научно-технический прогресс в металлургическом и химическом производствах" (Череповец, 1987 г.), "Физико-химия процессов восстановления металлов" (Днепропетровск, 1988 г.), "Моделирование процессов в шахтных и доменных печах" (Свердловск, 1988 г.); на Всесоюзном совещании по доменному производству (Липецк, 1973 г.); конференциях "Проблемы автоматизированного управления доменным процессом" (Киев, 1975 г., Мариуполь, 1985 г.); на научном совете "Новые процессы в черной металлургии" при ГКНТ СССР (Москва, 1989 г.); на международных конгрессах доменщиков (Тула, 1992 г., Новокузнецк, 1995 г.); на международной конференции "Теория и технология аглодоменного производства" (Днепропетровск, 1995 г.).

В 1978 г. первым руководителям бывшего Совмина СССР была представлена записка "Сравнительная технико-экономическая эффек-

тивность капитальных вложений в агломерационное и доменное производство и пути их рационального использования", которая затем обсуждалась в Госпланах СССР и Украины.

Публикации. По теме диссертации опубликованы монография, две книги, 37 статей, получены 6 авторских свидетельств на изобретения и патент Украины.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 разделов, заключения, списка литературы из 310 наименований и приложения. Основное содержание работы изложено на 345 стр. машинописного текста, включая 73 рисунка и 51 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Исследуемые в работе вопросы относятся к разным сторонам доменного процесса, поэтому уровень их разработки и задачи, подлежащие решению, представлены отдельно по разделам работы.

1. ПОЛАЧА ДУТЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ТОПЛИВА В ГОРН ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Важнейшей задачей организации газового потока на начальной стадии является равномерное распределение его по окружности доменной печи, предупреждающее несимметричный разгар кладки, интенсивный прогар фурм, холодильников, неудовлетворительное использование газов. Основная причина неравномерного распределения газов в горне, как известно, — различие расходов дутья через фурмы. Исследования на холодных моделях показывали, что неравномерность распределения дутья и другие возмущения сказываются на распределении газов лишь на ограниченной высоте — до 1,5 радиусов горна R . С учетом этого и других доводов А.Н.Рамм, например, считал регулирование расходов дутья необязательным, а М.А.Стефанович — даже вредным, полагая, что для управления газовым потоком достаточно регулирования его сверху — режимом загрузки шихты.

В работе показано, что в действующих доменных печах, в отличие от холодных моделей, неравномерный поток газов внизу обуславливает различия по секторам печи температурных условий, толщины и расположения гарниссажа, физического состояния и скорости стока шихты, которые влияют на газовый поток еще на высоту $1,5 R$ — и так до колошника. Невозможность эффективного управления потоком газов без регулирования расходов дутья доказана на практике на доменных печах, в том числе объемом 5000 м^3 меткомбината (МК)

"Криворожсталь", где режим загрузки регулировался бесконечным аппаратом, который обладает неограниченными возможностями и, как считали, должен был обеспечить равномерное окружное распределение газа в шахте. Однако на печи всю кампанию до 1984 г. был хронический односторонний ход, при котором температуры поверхности шихты в северном и южном секторах колошника отличались на 300-400 °С. Причиной такого хода, как было установлено, являлось различие расходов дутья через разные фурмы: они составляли от 59 до 175 % от среднего. И только их выравнивание с установкой фурм различного диаметра нормализовало работу печи.

Важность равномерного распределения дутья диктует необходимость периодических контрольных измерений его расходов по фурмам, которые достаточно проводить 1-2 раза в месяц, поскольку при стабильной работе печи характер распределения дутья, как установлено, сохраняется неделями. Эти измерения несложно проводить вручную - неохлаждаемыми напорными трубками разработанной нами конструкции, применявшимися на фурменных приборах с арматурой любого типа.

Регулярные измерения показали, что неравномерность окружного распределения дутья усиливается при сокращении его общего расхода, поэтому более или менее длительную работу доменных печей на сокращенном дутье или тихом ходу не следует допускать.

С началом применения природного газа были связаны не только положительные, но и ряд негативных последствий, в частности ухудшение дренажа в горне. Одна из причин этого, как нами впервые было установлено, заключалась в крайне неравномерном распределении природного газа по фурмам: расходы его составляли от 0 до 188 % от среднего. Вместе с тем выяснили, что расход природного газа D через фурму влияет на расход дутья V_d :

$$V_d = \frac{V_d^1}{\alpha \left(1 + \frac{(\bar{H}_2) D}{\omega} \right)}; \quad (I)$$

где V_d^1 - расход дутья при отключении природного газа;

(\bar{H}_2) - суммарная доля H_2 в природном газе, m^3/m^3 ;

ω - объемная доля O_2 в дутье, m^3/m^3 ;

α - коэффициент, постоянный для всех фурм.

Таким образом, неравномерное распределение природного газа, вредное само по себе, усиливает неравномерность распределения дутья, увеличивает разницу соотношений $D:V_d$ и теоретических температур горения между фурмами, которая например на доменной

печи объемом 2002 м³ Мариупольского МК достигала 300–400 °С, а на печи объемом 5000 м³ "Криворожстали" доходила до 500 °С. При этом в отдельных секторах печей терялась подвижность шлага и дренажная способность горна, усиливался прогар фурмы. Поэтому внедрение систем автоматического распределения природного газа дало большой эффект. Но он был обусловлен не только выравниванием температур по секторам печей, но и сокращением выделения сажи и сажеобразованию было высказано нами (и одновременно Ш.Миншаром) вначале на основе анализа данных теории термоокислительного пиролиза углеводородов и результатов исследования процессов смешения и взаимодействия природного газа и дутья, которые, как показано в работе, для формирования и использования газового потока имеют не меньшее значение, чем регулирование их расходов по фурмам. Эти процессы впервые исследованы во всем объеме фурмы, зоне горения и горне с помощью специально разработанных методик и оборудования. Установлено, что условия для сажеобразования возникают при неполном смешении природного газа и дутья, когда отношение скоростей их потоков в фурме ниже 1,2: природный газ проглатывает в дутье неглубоко, прогревается и окисляется слабо, и из верхней зоны фурмы в очаг горения выходят смеси, богатые метаном, часть которого может попасть за окислительную зону и подвергнуться термическому пиролизу с выделением сажи и сажеобразованию. Эти предположения зримо подтвердились при разработке технологии плавки с вдуванием мазута: при неудовлетворительной организации его подачи и смешения с дутьем водоотстойники газоочистки заполнялись сажей, скопления которой исчезали или уменьшались после установки на всех фурмах дозирующих насосов.

2. ФОРМИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В ГОРНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

При обычном подводе сверху природный газ в фурме смешивается с дутьем, как показано, неполно. Поэтому при исследовании процессов в горне выяснили, происходит ли дальнейшее его смешение с дутьем и газами в фурменной зоне, поскольку только более полное смешение может обеспечить улучшение распределения и использования продуктов горения метана в печи. Но определить долю $K_{\text{ПГ}}$ метана и продуктов его горения в газе по радиусу горна по содержанию H_2 в отобранных там пробах невозможно, поскольку часть H_2 может быть связана в H_2O . Поэтому $K_{\text{ПГ}}$ определяли индикацией природного газа

инертным газом — радиоактивным криптоном Kr^{85} . В природном газе, добавляя Kr^{85} , создавали определенную активность, по степени уменьшения которой в пробах газа из горна определяли $K_{\text{пг}}$. Установлено, что она резко уменьшается на участке 0,5 м перед фурмой и далее до оси печи ее значение составляет лишь 33–37 % от расчетного. Это значит, что в зоне горения дополнительного, после фурмы, смешения продуктов горения метана с дутьем и фурменными газами не происходит и они распределяются неравномерно: больше половины уходит вверх через периферийное сечение, где сосредоточен в основном кокс и только 1/4 агломерата, и лишь 1/3 распределяется по сечениям гребня, где сосредоточено почти 2/3 всего агломерата. Следовательно, улучшить их распределение можно только более полным смешением природного газа (мазута) с дутьем в фурме. На основе результатов исследований разработаны способы улучшения смешения: путем подачи природного газа в нижнюю или осевую зону фурмы или максимального увеличения скорости его истечения. Лучшее смешение позволяло более равномерно распределять и полнее использовать продукты горения природного газа даже при его очень высоких удельных расходах и таким образом повышать эффективность применения комбинированного дутья. В ходе исследовательских и практических работ определено влияние на смешение разных топлив в фурме их параметров, которые отрабатывались с учетом свойств этих топлив. На основе перечисленных и других исследований и практического опыта разработаны требования к параметрам дутья и вдуваемых топлив, организации и системам их подачи, что способствовало разработке и внедрению в Донецком регионе экономически выгодных режимов комбинированного дутья с умеренным обогащением дутья кислородом и самым высоким в металлургической практике расходом природного газа (176 м³/т чугуна на Янакиевском заводе), а также позволило впервые разработать и внедрить технологию плавки с совместным вдуванием мазута и природного газа — без значительного сажевыделения и технологических осложнений. Экономический эффект от внедрения этих разработок составил более 7 млн.руб. (в ценах 70–80-х г.г.).

Полученные с помощью Kr^{85} данные о распределении продуктов горения метана позволяли впервые расчетом определить количество водяных паров V_{H_2O} в различных точках горна:

$$V_{H_2O} = V_{H_2\text{пг}} + V_{H_2\text{д}} + V_{H_2\text{к}} - V_{H_2}, \quad (2)$$

где $V_{H_2\text{пг}}$, $V_{H_2\text{д}}$, $V_{H_2\text{к}}$ — количества H_2 , вносимого природным газом, влагой дутья и коксом,

V_{H_2} - количество свободного H_2 в газе (по хим. анализу).

Расчеты показывают, как и ранее выполненные исследования З.И. Некрасова и Ф.Н. Москалина, что водяные пары проникают в гоуа на 2,0-2,5 м от фурм. Следовательно, H_2O при температурах 1800-1300 °С взаимодействуют с углеродом кокса менее активно, чем CO_2 . Вместе с тем исследования хода восстановления показали, что в непосредственной близости от фурм опускаются вниз недостаточно восстановленные и прогретые (не выше 1200-1300 °С) материалы из сечений гребня, которые довосстанавливаются здесь в основном прямым путем. Нередко эти материалы достигали уровня фурм, и тогда содержание CO в газе на расстоянии 1,5-4,0 м от фурм возрастало до 60-85 %. (В связи с этим есть основания полагать, что часть H_2O может "проскочить" в шахту через слой этих материалов, не прореагировав с углеродом кокса). Очевидно, что попадание недовосстановленной шихты в металлоприемник исключило бы возможность нормальной работы доменной печи. Отсюда впервые был сделан вывод о необходимости интенсивного потока газов от фурм к оси печи и далее в осевом сечении - достаточного для полного восстановления опустившейся из гребня шихты еще до ее прихода в горн. Особое значение это имеет, как подтвердила практика, для печей большого объема, в которых гребень занимает большую часть их сечения.

3. ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ РАБОТА ГАЗОВ И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ В СВЯЗИ С РАДИАЛЬНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ГАЗОВОГО ПОТОКА И ПРОХОДЯЩИМИ В НИЖНЕЙ ЗОНЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПРОЦЕССАМИ

Главной задачей организации и управления доменной плавкой является обеспечение эффективного взаимодействия газов с шихтой, определяющего использование их восстановительной и тепловой энергии и, в конечном счете, - удельный расход кокса. Однако изучение процессов восстановления и теплообмена затруднялось отсутствием данных о радиальном распределении газа и шихты, поэтому вопросы газораспределения и влияния его на ход процессов в теории практически не разработаны. Не случайно А.Н. Рамм, анализируя влияние различных факторов на расход кокса, влияние газораспределения не рассматривал, а И.Г. Товаровский констатирует, что учет его при аналитическом исследовании доменного процесса пока невозможен.

В выполненных исследованиях процессов в доменной печи № 5 объемом 2360 м³ Мариупольского МК по экспериментальным данным о

составе, температуре и давлении газов, распределении, химическом и петрографическом составе шихтовых материалов на шести ее горизонтах П1-П6 (рис. 1-3) применены специально разработанные инструментальный и расчетный способы определения радиального распределения газов. Это впервые позволило вести количественные расчеты и анализ процессов отдельно по высоте шести концентрических кольцевых сечений К1-К6 (рис. 1-3), а также в целом по высоте печи по интегрированным на горизонтах данным (рис. 2-а и 5-а).

Инструментальный способ основан на индикации газа в шахте радиоактивным криптоном. Расчетный способ построен на экспериментальных данных об изменении окисленности газа и железа в зоне косвенного восстановления, а также соотношении r агломерата и кокса в пробах шихты из различных сечений:

$$r_i = A_i : K_i \quad (3)$$

Изменение доли кислорода в 1 м^3 газа $\Delta(O_{ш})_i$ на участке высоты пропорционально ΔO_{Fe} - количеству кислорода, потерянного оксидами железа (в расчете на 1 кг агломерата):

$$\Delta(O_{ш})_i \cdot V_{Г_i} = \Delta O_{Fe_i} \cdot A_i, \quad (4)$$

$V_{Г_i} = \frac{\Delta O_{Fe_i}}{\Delta(O_{ш})_i} A_i = m_i A_i$ ($m_i = \frac{\Delta O_{Fe_i}}{\Delta(O_{ш})_i} = \frac{V_{Г_i}}{A_i}$), (5)
где $A_i, K_i, V_{Г_i}$ - количества агломерата, кокса и газа, проходящих через кольцевое сечение i за время вылавки 1 т чугуна;

m_i - соотношение газа и агломерата в сечении, $\text{м}^3/\text{кг}$.

При одинаковой скорости схода шихты по радиусу печи значения $V_{Г_i}$ при любом количестве сечений i равнялись бы:

$$V_{Г_i} = m_i \left(\frac{A_i}{i \gamma_a} + \frac{K_i}{i \gamma_k} \right) \frac{\delta_a}{1 + \frac{\delta_a}{r_i \delta_k}}, \quad (6)$$

где γ_a и γ_k - удельные массы агломерата и кокса, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В общем случае - при разной скорости схода шихты в сечениях - значения $V_{Г_i}$ при $i=6$ определяются из 8 уравнений. Баланс агломерата и кокса в соответствии с (3) и (5):

$$\sum A_i = \sum \frac{V_{Г_i}}{m_i} = A, \quad (7)$$

$$\sum K_i = \sum \frac{A_i}{r_i} = \sum \frac{V_{Г_i}}{m_i r_i} = K. \quad (8)$$

Баланс компонентов колоннчатого газа:

$$\sum V_{Г_i} \text{CO}_{2_i} = V_{Г} \text{CO}_2, \quad (9)$$

$$\sum V_{Г_i} \text{CO}_i = V_{Г} \text{CO}, \quad (10)$$

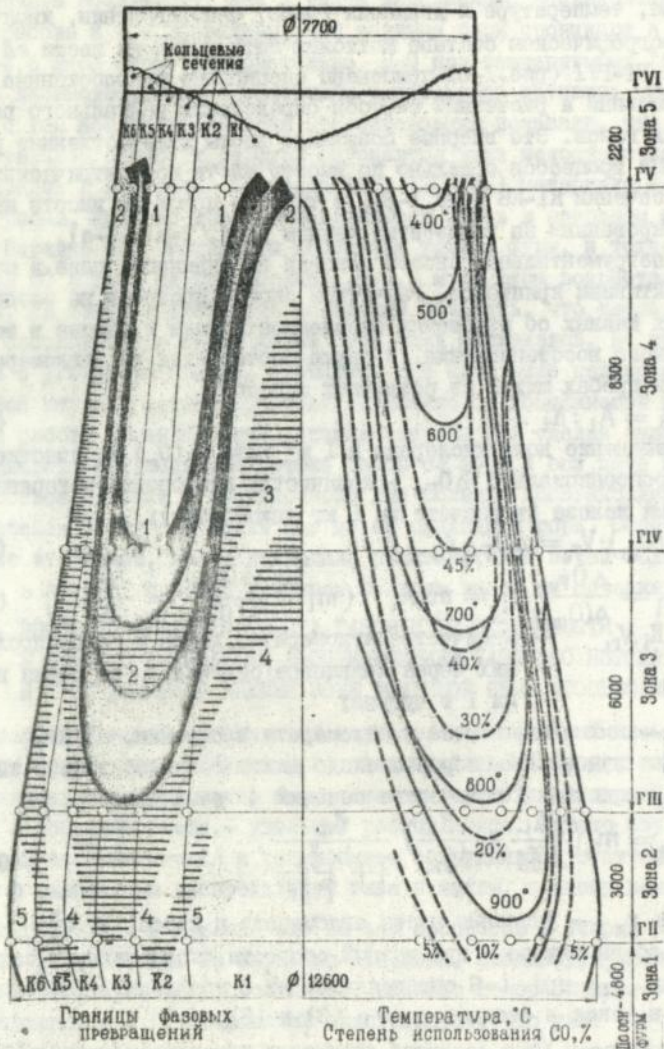


Рис. 1. Карта фазовых превращений железа, степень использования CO и температура газов в доменной печи ЛБ в периоде В (1, 2 - границы появления вюстита и металлического железа; 3, 4, 5 - границы полного восстановления ге атита, магнетита и вюстита)

$$\sum V_{Г_i} H_{2i} = V_{Г} H_2. \quad (11)$$

Общее количество колошникового газа:

$$\sum V_{Г_i} = V_{Г}. \quad (12)$$

Обозначения в уравнениях (7)-(12):

$A, K, V_{Г}$ — расход агломерата, кокса и выход газа (на 1 т чугуна);

CO_{2i}, CO_i, H_{2i} — объемная доля компонентов в газе на колошнике в кольцевом сечении i ;

CO_2, CO, H_2 — то же в общем колошниковом газе.

Ход восстановления анализировали по количеству передвинутого в газ кислорода шихты ($O_{ш}$), в том числе при прямом восстановлении (O_d), индексу прямого восстановления \bar{K}_d , которые рассчитывали по формулам А.Н.Рама, за исключением значений D — отношения природный газ : дутье, которое, учитывая неравномерное распределение продуктов горения природного газа, не принимали средним для печи, а определяли отдельно для каждой пробы газа:

$$D = \frac{f}{200} \left[\frac{H_2 + H_2O}{n} - (\varphi + H_{2к}) \right], \quad (13)$$

где φ — влажность дутья, %;

n — отношение объема сухого дутья к объему сухого газа.

Условия и ход восстановления в отдельных сечениях совершенно различны, как следует из впервые составленной для действующей доменной печи карты фазовых превращений железа, температуры газа и степени использования $CO \cong CO$ (рис.1). Это обусловлено вынужденной загрузкой агломерата, обладающего низкой газопроницаемостью, преимущественно в промежуточные сечения печи (гребень) и, как следствие, различием соотношений m_i газ:агломерат по сечениям. Наименее равномерным газораспределение было в одном из периодов исследований — А (рис.2), в котором печь работала на обфлюсованном агломерате, с расходом кокса 539 кг/т чугуна и выходом колошникового газа 2070 м³/т. Количество газов $V_{Г_i}$ в сечениях составляло (в % от их общего выхода):

Сечение	K1	K2	K3	K4	K5	K6
$V_{Г_i}, \%$	21,0	11,5	9,0	12,7	20,6	25,2

Другой период — Б (рис.1,3,5,6) отражает характерный для печи режим работы с меньшим расходом кокса (501 кг/т) и выходом газов (1877 м³/т). Распределение газов в этом периоде было более равномерным:

Сечение	K1	K2	K3	K4	K5	K6
$V_{Г_i}, \%$	18,9	13,9	12,3	13,1	19,1	22,7

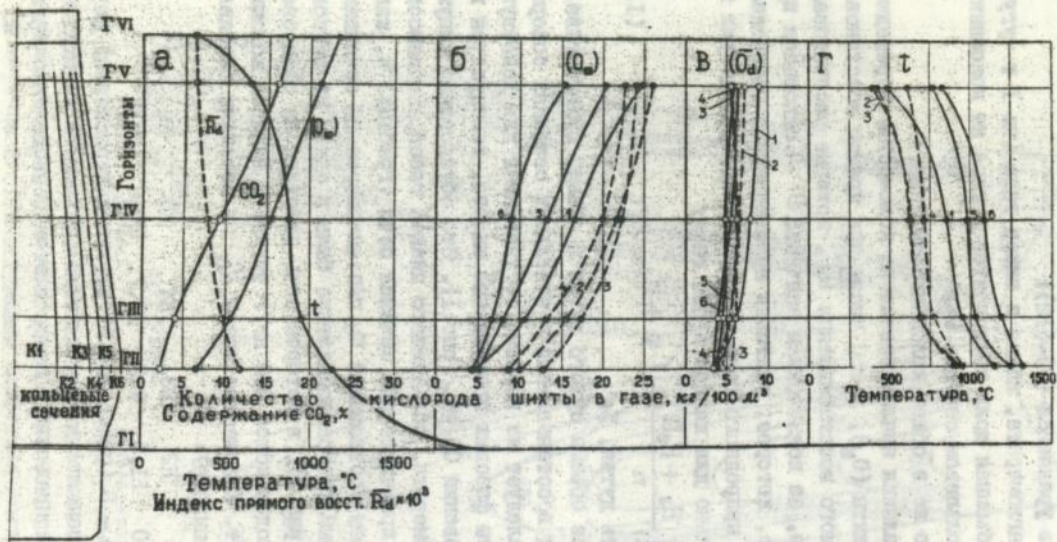


Рис.2. Количество газифицированного кислорода шихты ($\bar{O}_ш$) и (\bar{O}_d), содержание CO_2 , температура газа t и индекс прямого восстановления \bar{R}_d по высоте доменной печи № 5 в периоде А (а - средние значения на горизонтах ГI-ГVI; б-г - в кольцевых сечениях КI-К6)

$m_i, \text{м}^3/\text{кг}$ 1,69 0,77 0,60 0,68 1,39 1,82

В осевом и периферийных сечениях К1 и К5-6 восстановление всех окислов железа идет интенсивно уже от колошника вследствие большого избытка газа, низкой его окисленности и высокой температуры (рис.1; 2-б,г; 3; 5-б; 6-б). Напротив, в гребне вследствие дефицита газа и низкой температуры восстановление железа с заметной скоростью идет лишь со среднего горизонта шахты ГV и проходит ступенчато - от оксида к оксиду, что обусловлено близостью состава газа к равновесному (рис.1,3,б-а), т.е. термодинамическими, а не кинетическими, как обычно полагают, факторами.

Результатом неравномерного распределения газа является крайне нерациональное использование его в печи. С одной стороны, в гребне вследствие дефицита газа его использование предельно: температура его t_k на колошнике минимальна - 250°C (рис.6-а), а Σ_{CO} достигает 0,5 (рис.1,3). Но шахта здесь даже в распаре (горизонт ГII) восстановлена только на 40-55 % (рис.1), прогрета, как показали расчеты, лишь до $750-800^\circ\text{C}$ (рис.6-а) и ниже восстанавливается в основном прямым путем с большим расходом кокса. С другой стороны, в сечениях К1 и К5-6 железо к распару практически полностью восстановлено, а шахта прогрета до $1050-1100^\circ\text{C}$ (рис.5-б и 6-б), хотя при большом избытке газа степень его использования даже на колошнике здесь низка: $t_k=400^\circ\text{C}$, а Σ_{CO} едва достигает 0,3 (рис.1,3). Совершенно очевидно, что максимально возможное использование газов и минимально возможный расход кокса можно обеспечить только при равномерном распределении шахты и газа. Однако характер их распределения устанавливается не произвольно, а диктуется качеством агломерата по гранулометрическому составу: чем оно ниже, тем менее равномерно приходится распределять агломерат и газ, чтобы обеспечить устойчивый ход доменной печи. Равномерное распределение газа возможно лишь при использовании однородного по крупности и не содержащего мелочи агломерата.

Данные о распределении газа позволили впервые установить, что противоток газов и шахты в нижней зоне печи нарушается. В сечениях К1 и К5-6 к распару в шахте уже почти нет газифицируемого кислорода - линии O_{II} на рис.3. Однако в поднимающемся снизу газе его во много раз больше - линии (O_{II}) . В гребне наоборот: O_{II} больше (O_{II}) . Разница между O_{II} и (O_{II}) сохраняется на всех горизонтах. Значит, поднимающиеся от фурменских очагов газы отнимают кислород у слабо восстановленной шахты, пришедшей вниз из гребня, и затем часть его

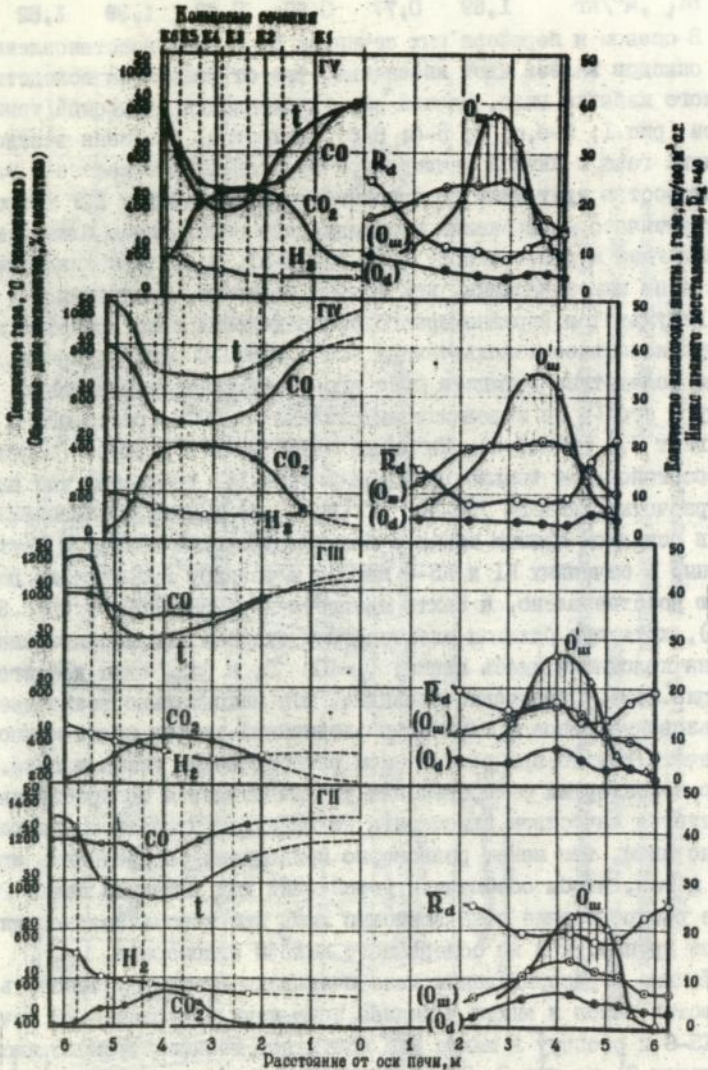


Рис. 3. Состав, температура газа и расчетные характеристики массообмена на горизонтах доменной печи № 5 в периоде Б

переносят на периферию и к оси. Таким образом, газифицируемый кислород шихты перераспределяется между сечениями и, следовательно, значения индекса \bar{R}_d , рассчитанные по составу газов в распаре и шахте (рис.3), завышены для сечений оси и периферии и занижены для гребня. В связи с этим следующий из результатов выполненных нами (а ранее М.А.Стефановичем, Л.А.Бялым и другими) расчетов вывод о минимальном развитии прямого восстановления в сечениях гребня (рис.3) представляется уже не бесспорным. Однако определить количество переносимого из одних сечений в другие кислорода (\bar{O}_d), отнятого от шихты прямым путем, и установить фактическое развитие прямого восстановления в сечениях можно только расчетом хода процессов восстановления и теплообмена по всей высоте этих сечений, включая самые нижние их зоны. Такие расчеты стали возможны только после получения данных о распределении газа. Они позволили впервые определить основные параметры процессов в отдельных сечениях, в том числе не поддававшиеся ранее расчетному или инструментальному определению, и таким образом реконструировать ход процессов во всем объеме доменной печи.

4. МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ХОДА ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕМЕ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Метод реконструкции в общем основан на расчетах распределения газа и многозонных балансов (в пяти зонах между горизонтами II-IV), впервые выполненных отдельно по кольцевым сечениям. В результате рассчитаны температура шихты на горизонтах $t_{ш}$, средние значения в зонах физической теплоемкости газов W'_r и шихты $W'_ш$, кажущихся теплоемкостей W_r и $W_{ш}$, интенсивности теплопередачи J , суммарных коэффициентов теплопередачи $\alpha_{\Sigma r}$ и другие параметры. При этом:

$$W'_r = \frac{\Delta \mathcal{E}'}{\Delta t_r}; \quad W_r = \frac{\Delta \mathcal{E}' - \Delta \Pi}{\Delta t_r} = \frac{\Delta \mathcal{E}}{\Delta t_r}, \quad \text{МДж/К.т}; \quad (14)$$

$$W'_ш = \frac{\Delta C}{\Delta t_{ш}}; \quad W_{ш} = \frac{\Delta C + \Delta Q_x}{\Delta t_{ш}} = \frac{\Delta Q}{\Delta t_{ш}}, \quad \text{МДж/К.т}; \quad (15)$$

где \mathcal{E}, C — энтальпии газа и шихты на горизонтах, МДж/т;

Π — потери тепла, МДж/т;

Q_x — затраты тепла на химические процессы, МДж/т;

Q — теплотребность процесса, МДж/т.

Метод реконструкции разработан с учетом общих положений теории теплообмена Б.И.Китаева, что позволило обнаружить радиальные перетоки газа, ввести в балансы дополнительные источники и стоки

тепла и таким образом согласовать тепловые балансы в зонах и соотношения $W_T:W_{ш}$ в них с характером изменения температуры газа t_T , приближая расчетное распределение тепла между ступенями теплообмена к фактическому.

Базой для расчета зональных балансов в сечениях, помимо входных и выходных параметров процесса, послужили наиболее надежные экспериментальные данные - о составе, температуре и давлении газов и петрографическом составе агломерата (рис.1,3), а также расчетные данные о распределении газов. Полученная реконструированная картина процессов (рис.4-9) близка к фактической, поскольку расчетные значения важнейших параметров (степени восстановления железа на всех горизонтах во всех сечениях, общий состав кокшепикового газа и другие) совпадают с определенными экспериментально или отличаются от них не более чем на 5-15%. Реконструкция хода процессов позволила не только определить фактическое развитие прямого восстановления в сечениях доменной печи, но и интерпретировать некоторые экспериментальные и расчетные данные, не соответствующие общепринятым представлениям, в том числе по некоторым фундаментальным вопросам теории доменного процесса.

5. ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ГАЗОВ НА ХОД МАССО- И ТЕПЛОБМЕНА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Самые общие закономерности процессов восстановления и теплообмена в доменной печи отражены в температурно-тепловой диаграмме П.Рейхардта, диаграмме А.Н.Рамла G_d-k (степень прямого восстановления - относительный расход кокса) и общей схеме теплообмена Б.И.Китаева, оказавших большое влияние на развитие теории доменного процесса. Однако они разработаны для условного идеализированного процесса с равномерным распределением шихты и газа, а также при некоторых упрощающих допущениях, и поэтому не могут вполне адекватно отражать реальные процессы, проходящие в объеме доменной печи.

В диаграмме П.Рейхардта (рис.4-а) энтальпия газа ϑ представляется прямой линией и, как следствие, ее производная по температуре - теплоемкость газа W_T (рис.4-б) - в схеме теплообмена Б.И.Китаева (рис.4-г) постоянна. Однако данные реконструкции показывают, что ϑ меняется неравномерно. Если бы фурменный газ по мере подъема только охлаждался, то энтальпия 1 м³ такого газа ϑ_{ϕ} при любой температуре t (рис.7-а) была бы:

$$\vartheta_{\phi} = (N_2 \cdot c + CO \cdot c + H_2 \cdot c)t, \quad (16)$$

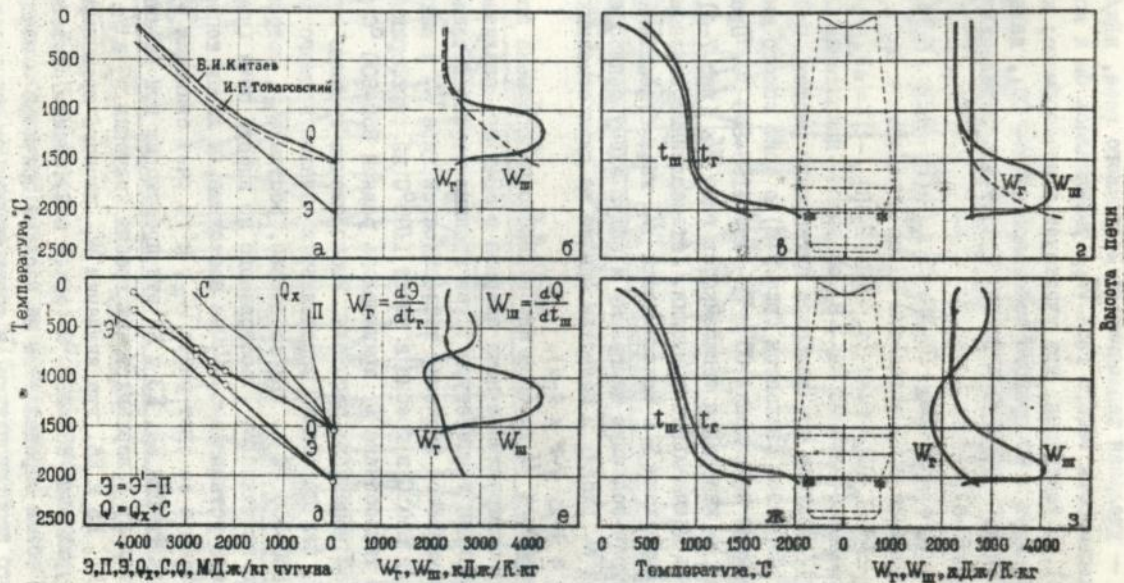


Рис. 4. Температурно-тепловая диаграмма доменного процесса и общая схема теплообмена (а-г - общепринятые; д-з - уточненные по данным исследований на доменной печи № 5)

где N_2, CO, H_2 — объемные доли компонентов;

c — удельная теплоемкость 2-атомного газа, кДж/К.м³.

Теплоемкость такого газа W_{Φ_0} уменьшалась бы к колошнику (рис.7-б). Естественно, газ участвует в массообмене: к нему сначала добавляется CO прямого восстановления — CO_d , далее часть H_2 окисляется до H_2O , а CO — до CO_2 (рис.7-в). Энтальпия такого газа Φ (рис.7-а):

$$\Phi = [N_2 c + (CO + CO_d - CO_2)c + CO_2 c_{CO_2} + (H_2 - H_2O)c + H_2O c_{H_2O}] t. \quad (17)$$

Приращение $\Delta \Phi$ энтальпии Φ по отношению к Φ_0 :

$$\Delta \Phi = \Phi - \Phi_0 = CO_d c t + CO_2 (c_{CO_2} - c) t + H_2O (c_{H_2O} - c) t = \Delta \Phi_{CO_d} + \Delta \Phi_{CO_2} + \Delta \Phi_{H_2O}. \quad (18)$$

Наибольшее влияние на $\Delta \Phi$ оказывает накопление CO и CO_2 (рис.7-г). Поэтому $\Delta \Phi$ наиболее интенсивно растет, а Φ с наименьшей скоростью снижается (рис.7-а) в зоне самого интенсивного массообмена и накопления CO и CO_2 при 1150–850 °C. Производная от Φ по t — кажущаяся теплоемкость газа W_{Φ} (рис.7-б) — принимает здесь минимальные значения. Установленные закономерности изменения энтальпии Φ и теплоемкости W_{Φ} газа существенно уточняют температурно-тепловую диаграмму и общую схему теплообмена, в которые Φ и W_{Φ} входят в качестве одного из двух основных элементов (рис.4-а и 4-д, 4-г и 4-з).

Уменьшение W_{Φ} в зоне интенсивного массообмена позволяет объяснить обнаруженное нами впервые в 60-х гг. различие по кольцевым сечениям температуры t_0 на границе ступеней теплообмена, где выравниваются значения теплоемкостей газа W_{Φ} и шихты $W_{Ш}$: она составляла 650 °C в гребне и почти 1100 °C на периферии (рис.2-г). В теории теплообмена t_0 принималась равной 850–900 °C и считалась константой доменного процесса. Расположение границы ступеней теплообмена, как полагали, определяется началом прямого восстановления при 850–900 °C и, как следствие, ростом $W_{Ш}$, которая увеличивается до значения W_{Φ} , постоянного по высоте печи (рис.4-г). Однако, как установлено, W_{Φ} не постоянна, и линии теплоемкостей пересекаются и за счет роста $W_{Ш}$, и за счет снижения W_{Φ} (рис.4-з). В сечениях гребня К2, К3 и К4 это происходит при низких температурах, поскольку в верхних зонах гребня значения W_{Φ} и $W_{Ш}$ близки, а в кольцах К1, К5 и К6, где значения W_{Φ} намного превышают $W_{Ш}$, — при температурах выше 850–900 °C (рис.5 и 6). Таким образом, температура t_0 в общем определяется не частной причиной — началом заметного прямого восстановления, а соотношением массопотоков газа и шихты в сечениях. (Несколько по-иному закономерности изменения t_0 пред-

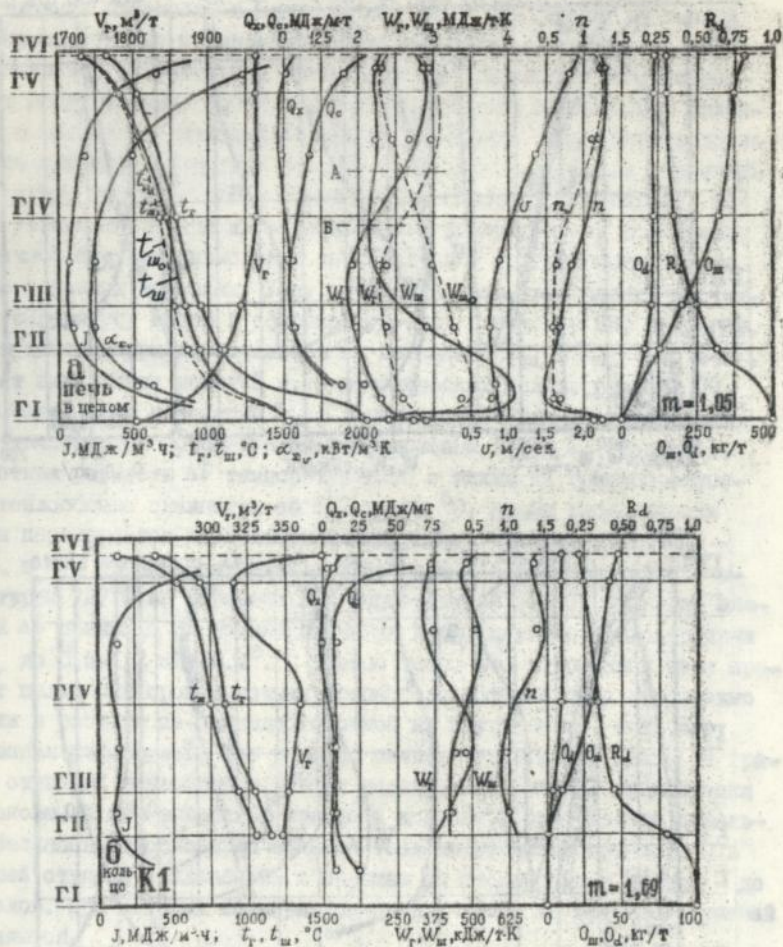


Рис. 5. Изменение основных параметров массо- и теплообмена по высоте доменной печи № 5 в целом (а) и кольцевого сечения KI (б) в периоде Б

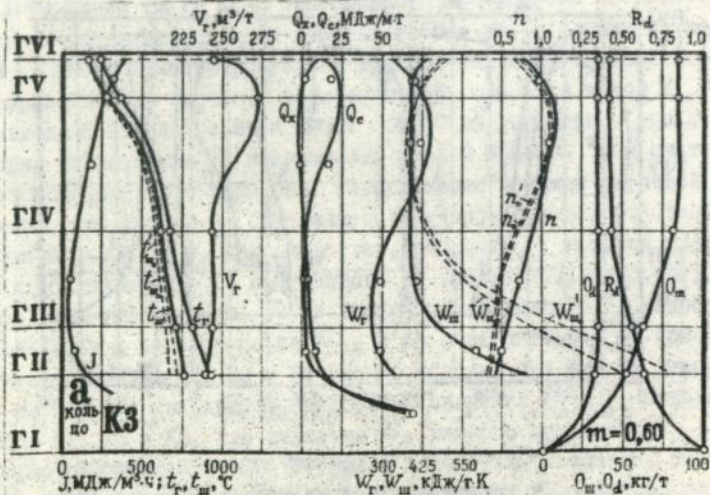
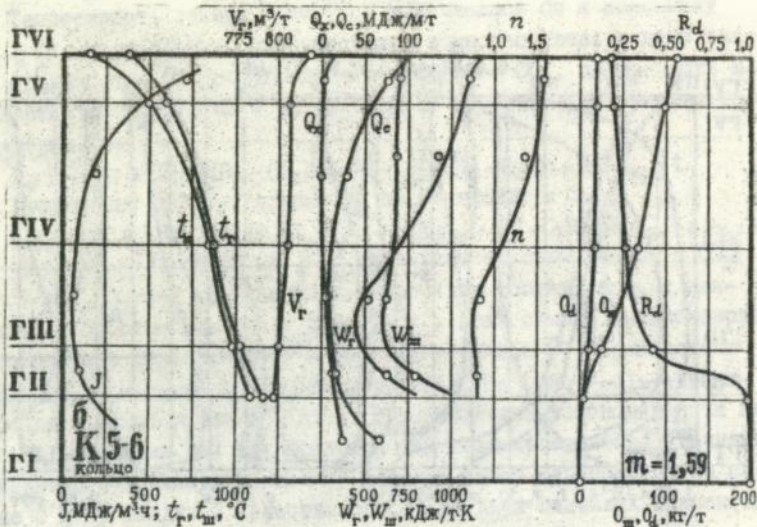


Рис. 6. Изменение основных параметров массо- и теплообмена по высоте кольцевых сечений КЗ и К(5-6)

ставляются в работах японских исследователей и И.Г.Товаровского). В связи с непостоянством t_0 теряются преимущества и неизбежно усложняется методика расчета двухзонных балансов.

В ходе реконструкции процессов выяснилось, что при расчете многозонных балансов, в отличие от общих, необходимо учитывать все промежуточные и циркуляционные процессы, оказывающие, как установлено, значительное влияние на распределение теплотребности между разными зонами. Без этого расчеты многозонных балансов, особенно в отдельных кольцевых сечениях, могут дать недостоверные или даже абсурдные результаты. Необходимо также учитывать радиальные перетоки газов из сечения в сечение, неизбежные, как нами установлено, при их неравномерном распределении вследствие различной скорости изменения температуры и фактического объема газов в разных сечениях. Учет перетоков газа увеличивает расчетную температуру шихты в сечениях гребня: в сечении К3, например, линия температуры перемещается из положения $t'_{ш_0}$ в $t_{ш_0}$ (рис.6-а), а учет циркуляции щелочей и, в методических целях, распада CO перемещает ее в положение $t_{ш}$. Линия средней для всего сечения печи температуры перемещается из положения $t_{ш_0}$ в $t_{ш}$ (рис.5-а), расчетная разность Δt температур газа и шихты на границе ступеней теплообмена снижается со 107 до 70 °С, длина теплоемкости шихты перемещается из положения $W_{ш_0}$ в $W_{ш}$, отношения $W_T:W_{ш}$ — из n_0 в n , граница ступеней теплообмена — с горизонта А с температурой 727°С на горизонт Б с температурой 806°С. Снижение значений Δt повысило расчетные значения коэффициентов теплопередачи $\alpha_{\Sigma V}$ до 0,5–1,2 кВт/К.м³. С учетом того, что в доменной печи проходит целый ряд промежуточных процессов, которые пока невозможно ввести в расчеты из-за недостаточной их изученности, есть все основания утверждать, что реально температуры газа и шихты на границе ступеней теплообмена, как и полагал Б.И.Китаев, практически одинаковы. А это позволяет повышать достоверность расчета зональных балансов, обоснованно понижая теплотребность процесса Q в верхней ступени теплообмена и повышая на столько же в нижней — до пределов, при которых температуры газа и шихты на границе ступеней сравниваются.

Реконструкция процессов позволила выяснить фактическое развитие прямого восстановления по радиусу печи. Установлено, что ниже распара половина кислорода, отнятого у шихты в сечениях гребня К2, К3 и К4 (горизонтальная штриховка внизу — рис.8), переносится га-

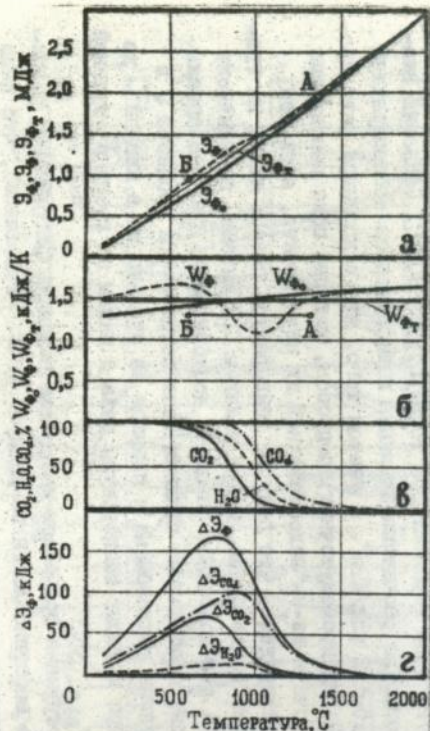


Рис.7. Изменение энтальпии и теплоемкости фурменного газа в ходе массо- и теплообмена

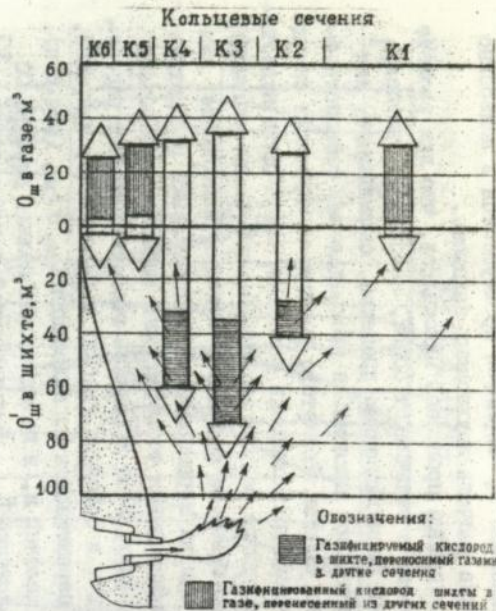
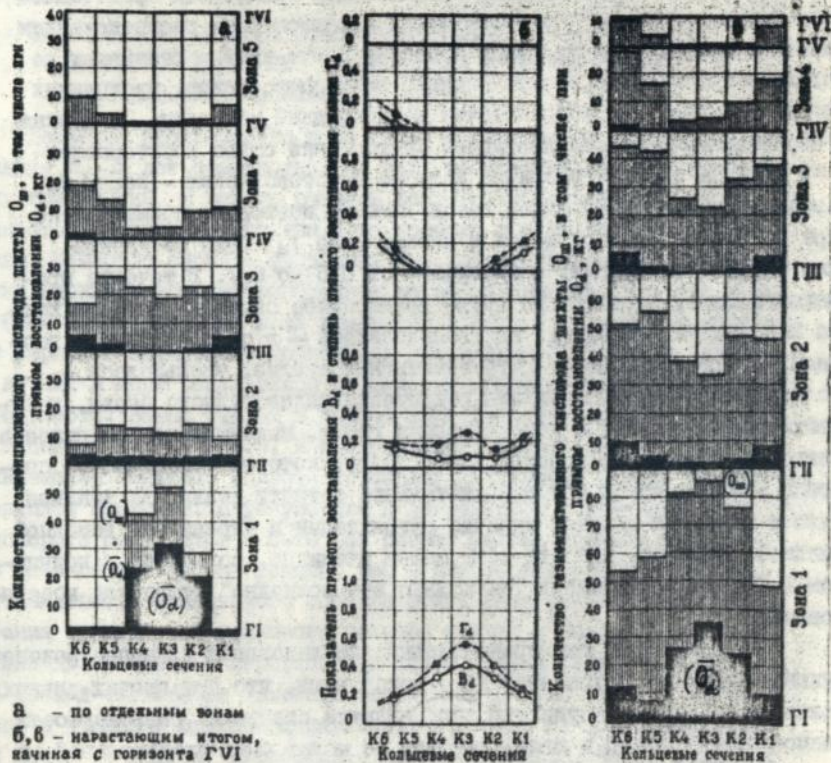


Рис.8. Количество газифицируемого кислорода в шихте $O_{ш}$ и количество кислорода да шихты в газе $O_{г}$ по отдельным сечениям в распаре (горизонт ГП)



а - по отдельным зонам
б, в - нарастающим итогом,
начиная с горизонта ГVI

Рис. 9. Общее количество кислорода ($O_{\text{ш}}$) и ($O_{\text{д}}$), потерянного шихтой в ходе массообмена, и показатели прямого восстановления

вами на периферию и к оси (вертикальная штриховка вверх). Это в основном кислород прямого восстановления \bar{O}_d (рис.9-а). Всего с учетом этого в сечениях гребня газифицируется 74% всего количества \bar{O}_d (рис.9-в), поэтому степень прямого восстановления здесь в 2-3 раза выше, чем на периферии и у оси (рис.9-б). Таким образом, сечение гребня является критическим, газопроницаемость которого определяет степень прямого восстановления Γ_d для доменной печи в целом. Это не согласуется с положениями теории, в соответствии с которыми Γ_d определяется общим выходом газов. Эти представления верны для условного противотока с равномерным распределением шихты и газов. Но в реальной плавке влияние на Γ_d оказывает не столько общий выход газов, сколько количество газов, проходящих через сечения, где сосредоточен железорудный материал. Их низкая газопроницаемость обуславливает приход вниз слабо восстановленной шихты и сильное развитие прямого восстановления — каким бы высоким не был общий выход газов. Именно поэтому в прошлом веке при громадном расходе кокса и выходе газа Γ_d была не низкой, как следует из теории, а высокой — от 0,5 до 0,7. В течение прошедшего века, несмотря на двух- трехкратное снижение расхода кокса и выхода газов, Γ_d не увеличивалась — в соответствии с теорией, а, как показывает ретроспективный анализ, уменьшалась — вследствие совершенствования подготовки железорудного сырья, улучшения распределения и использования газов. Максимально возможное в конкретных условиях использование газов, которое обеспечивает снижение расхода кокса без дополнительной затраты тепла или топлива, было и остается главной задачей организации и управления доменной плавкой, которая, как это совершенно очевидно, совпадает с принципом Л.Гринера: развивать "насколько это возможно" косвенное восстановление.

Таким образом, экспериментальные исследования и данные реконструкции процессов в доменной печи показывают, что при прочих равных условиях их ход и результаты определяются степенью равномерности распределения шихты и газа, которая не может быть произвольной, а зависит от качества железорудного сырья. В улучшении гранулометрического состава этого сырья и выравнивании газораспределения заложены главные резервы доменного производства. Примерно их можно оценить с помощью диаграммы Γ_d -К М.М.Лейбодича-А.Н.Раппа, которая построена для идеализированной доменной плавки с равномерным распределением шихты и газа и на которой показаны, как подчеркивал

А.Н.Рамм, минимально возможные значения степени прямого восстановления $\Gamma_{d\min}$ и относительного расхода кокса k_{\min} . Фактические значения Γ_d и k показывают степень удаления реальной плавки от идеализированной, а разница между фактическими и минимально возможными значениями — возможности снижения Γ_d и k при термодинамически предельном использовании газа, которое возможно только в случае равномерного его распределения. Но для реализации этих возможностей необходимо радикальное улучшение качества загружаемого в доменные печи агломерата.

6. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА ДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА И РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАПИТАЛЬНЫХ ВЛОЖЕНИЙ

Доменное производство в развитых промышленных странах последние 30–35 лет развивалось по пути реализации энергосберегающих технологий, в первую очередь полного использования всех возможностей улучшения качества загружаемого в печи железорудного сырья. Качество сырья — фундамент, на котором строится вся технология плавки и который определяет ее эффективность. Это еще в 50–60-х годах доказали наши доменщики в цехах, получивших агломерат хорошего качества и добившихся без природного газа и кислорода да лучших в мире результатов по расходу кокса и удельной производительности. Нашим опытом в полной мере воспользовались металлурги Японии и других стран. В проводившейся в нашей металлургии технической политике подготовке сырья придавалось далеко не перво-степенное значение. В результате в загружаемом в доменные печи агломерате содержится в 5–10 раз больше мелких фракций и в 1,5–1,8 раза больше пустой породы, чем в агломерате развитых стран. Нестабильность химического состава агломерата вызывает резкие колебания теплового и шлакового режимов плавки с большими потерями производительности и перерасходом кокса. Вследствие этого суммарный расход топлива на доменных печах СССР к 1990 г. стал на 12–25% выше, а удельная производительность, несмотря на использование в год почти 20 млрд. м³ кислорода, — на 10–20 % ниже, чем в развитых странах.

Если бы средства, затраченные на производство громадного количества кислорода и строительство части новых доменных печей, были направлены на строительство и модернизацию аглофабрик, то при меньшем на 15% парке доменных печей обеспечивался бы тот же выпуск чугуна при меньшем на 15–20 % расходе кокса. Это показала выполнен-

ний нами еще в 70-е годы сравнительный технологический и экономический анализ эффективности различных способов снижения расхода кокса и увеличения выработки чугуна. Экономические расчеты впервые были проведены на народнохозяйственном уровне и показали, что по капитальным затратам, срокам их окупаемости и другим показателям улучшение качества скипового агломерата — снижение в нем содержания мелочи до 5% — является наиболее выгодным способом экономии кокса и, что не менее важно, единственным крупным энергосберегающим способом. Он обеспечивает снижение расхода кокса на 9–13 % (в зависимости от доли агломерата в шихте) не путем замены его другим видом топлива или расхода дополнительного тепла, как в других способах, а за счет улучшения распределения и использования газов в доменных печах. Улучшение качества агломерата, кроме того, повысило бы эффективность применения всех других технологических разработок.

Выгодным по всем показателям является повышение нагрева дутья, которое можно отнести к энергосберегающим способам. Его реализация обеспечила бы снижение расхода кокса еще на 4%. Таким образом, применение только энергосберегающих способов позволило бы снизить расход кокса более чем на 13–17 %. Из заменителей кокса наиболее перспективны угольная пыль и мазут, либо более выгодное во всех отношениях их сочетание — мазуто-угольная паста.

Однако в современных условиях — при отсутствии средств на радикальное улучшение качества агломерата — реальны лишь мероприятия, которые могут дать значительный эффект без сколько-нибудь существенных затрат. Возможности для этого заложены в недостатках технологии, конструкции и работе оборудования, консервативных инструкциях, нормах и т.д. Это относится и к подготовке к плавке производимых в отрасли агломерата и кокса. Применявшаяся на доменных печах технология частичного удаления из бункерного агломерата мелочи на литых колосниковых решетках с зазором 5–6 мм крайне нерациональна: в скиповом агломерате остается в среднем 4–6 % мелочи фракции 0–3 мм, в наибольшей мере ухудшающей газопроницаемость шихты, а в отсеивающей подается примерно такое же количество агломерата крупностью более 3–5 мм, пригодного для плавки. Гораздо целесообразнее перевести эти 4–6 % мелочи крупностью менее 3 мм из скипового агломерата в отсеивающий, а 4–6 % агломерата крупнее 3–5 мм из отсеивающего вернуть в скиповый агломерат, т.е. без увеличения количества отсеивающего полностью удалить из скипового агломерата самую мелкую

фракцию, заменив ее более крупной. Как показали исследования на газодинамических установках, при полном удалении из агломерата мелочи крупностью менее 2,5-3,0 мм вместо такого же количества мелочи 0-5 мм уменьшение потерь напора в слое доменной шихты возрастает вдвое. Появившиеся газодинамические резервы можно использовать либо для снижения расхода кокса путем более равномерного распределения агломерата и лучшего использования газов, либо для интенсификации плавки, либо для увеличения выхода скипового агломерата - за счет уменьшения нижнего предела его крупности и количества отсева. На этом основан разработанный Донничерметом "Способ классификации шихтовых материалов" и полученный на него патент. Внедрение способа не требует дополнительных затрат и осуществляется путем замены литых колосниковых решеток виброгрохотов на цельные решетки из листовой стали. Щели заданной ширины - от 2,5 до 4,0 мм - прорезаются плазмой. Цельные решетки обеспечивают практически полное удаление из агломерата самых мелких фракций любого нужного размера - в зависимости от гранулометрического состава агломерата и заданного количества отсева. Внедрение способа в 1990 г. на доменных печах, оборудованных агломерационными виброгрохотами, позволило снизить расход кокса на 1,5-3,5 % или увеличить выход скипового агломерата.

Исследования на газодинамических установках показали целесообразность снижения нижнего предела крупности кокса с 25-32 мм до 15 мм. Однако при использовании на виброгрохотах сит с круглыми отверстиями это неизбежно привело бы к увеличению замусоренности кокса. Поэтому были разработаны конструкции и способ изготовления решеток из листовой стали с рядами наклонно расположенных щелей. Щели расширяются книзу, и кокс в них практически не кострится, вследствие этого площадь живого сечения щелевых решеток в 1,5-2,0 раза больше, чем у сит с круглыми отверстиями. Это обеспечило снижение замусоренности кокса в 1,5-3,0 раза, что само по себе имеет большое значение, особенно для работы горна. При снижении крупности скипового кокса до 17-15 мм выход его из того же количества товарного кокса увеличился на 1,1-1,9 % - за счет перевода из отсева в скиповый кокс 2,0-3,0 % фракции 30-15 мм (от всего товарного) и одновременного перевода из скипового кокса в отсев дополнительно 0,5-1,0 % мусора фракции 0-15 мм.

На коксе уменьшенной до 15-17 мм крупности с 1991-1992 г.г. постоянно работали 36 доменных печей Украины. В Донничермете

создан специализированный участок плазменной резки по изготовлению технических средств для классификации агломерата и кокса, обеспечивающий потребности отрасли. Внедрение технологии рационального использования и подготовки к плавке агломерата и кокса позволило в 1992-1994 г.г. в доменном производстве Украины увеличить количество скипового агломерата в среднем на 440 тыс.т в год и скипового кокса на 160 тыс.т - без увеличения их товарного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации дано теоретическое обобщение и решение научной проблемы, заключающейся в определении влияния распределения газа в доменной печи на массо- и теплообмен, ход и результаты которых определяют расход кокса, но теория которых разработана практически только для условной идеализированной доменной плавки с равномерным распределением газа и, следовательно, не может вполне адекватно отражать проходящие в объеме печи реальные процессы. Научная проблема решена экспериментальным исследованием превращений шихты и газа в объеме печи, расчетом на основе данных этих исследований распределения газа и основных параметров массо- и теплообмена в отдельных кольцевых сечениях и теоретическим анализом впервые полученной во всем объеме доменной печи картины реальных процессов, который выявил новые, в том числе свойственные только реальной плавке закономерности, расширяющие научную базу для определения наиболее эффективных путей совершенствования технологии и снижения расхода кокса.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Экспериментально установлено, что неравномерность окружного распределения газа в горне обусловлена не только различием расходов дутья через фурмы, но и крайне неравномерным распределением по фурмам природного газа, расходы которого до освоения систем автоматического их регулирования составляли по фурмам от 0 до 188 % от среднего. Это обуславливало различие температурных условий, подвижности шлака по окружности печи, ухудшало работу горна, усиливало прогар фурм и диктовало необходимость выравнивания расходов природного газа (мазута) по фурмам.

2. Показано на основании впервые выполненных во всей полосе фурмы исследований взаимодействия природного газа с дутьем,

а также определенного с помощью радиоактивного индикатора распределения продуктов горения метана в горне, что важнейшим условием организации подачи природного газа и мазута в горн, наряду с равномерным распределением их по фурмам, является возможно более полное смешение их с дутьем, которое повышает полноту горения углеводородов, улучшает распределение и использование в печи образующихся CO и H_2 . Разработаны способы улучшения смешения за счет максимального увеличения скорости истечения природного газа или подачи его в нижнюю либо осевую зону фурмы. Это позволяло сохранять достаточно высокие коэффициенты замены кокса природным газом и мазутом даже при очень высоких их расходах и легло в основу технологии применения комбинированного дутья на предприятиях Донецкого региона.

3. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что одним из негативных последствий неудовлетворительного смешения дополнительных топлив с дутьем является термический пиролиз углеводородов с выделением сажистого углерода, ухудшающего дренаж в горне.

4. Показано, что возникшая ввиду окружная неравномерность газового потока проявляется в доменных печах, в отличие от холодных моделей, не на ограниченной высоте, а вплоть до колошника, поэтому управлять газовым потоком необходимо не только сверху режимом загрузки, но и снизу — регулированием подачи дутья и дополнительного топлива. Это доказано на практике при исследовании причин и ликвидации хронического одностороннего хода на доменной печи объемом 5000 м^3 , при выравнивании окружного распределения газов на других печах.

5. На основе выполненных исследований и практического опыта определены требования к параметрам дополнительных топлив, организации и системам их подачи в доменную печь, что способствовало внедрению технологии плавки с максимальными в металлургической практике расходами природного газа (до $176 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна), а также освоению впервые разработанной технологии плавки с совместной подачей природного газа и мазута — без значительного сажевыделения при умеренном обогащении дутья кислородом.

6. Восстановительная и тепловая работа газа впервые исследовалась с учетом его радиального распределения, определявшегося двумя разработанными способами: инструментальным — путем индикации газа в шахте радиоактивным криптоном, а также расчетным, основан-

ным на данных об изменении окисленности газа и шихты в зоне косвенного восстановления.

7. Экспериментальные данные о распределении, химическом и петрографическом составе шихты, составе и температуре газа на шести горизонтах доменной печи показывают резко неравномерный ход процессов по радиусу печи, обусловленный вынужденной загрузкой агломерата, обладавшего низкой газопроницаемостью, в основном в промежуточные сечения (гребень) и, как следствие, разным соотношением газа и агломерата: от 0,6–0,7 м³/кг в гребне, где сосредоточен в основном агломерат, до 1,7–1,8 на периферии и у оси, где сосредоточен кокс.

8. Следствием неравномерного распределения газа является нерациональное его использование: низкое на периферии и у оси и предельное в гребне. Вследствие дефицита газа шихта в сечениях гребня даже в распаре восстановлена лишь на 40–55 %. Приход недовосстановленной шихты в металлоприемник нарушил бы нормальный ход процесса. В связи с этим впервые обоснована необходимость интенсивного потока газов от флурм к оси печи – достаточного для полного восстановления шихты, опустившейся из гребня, еще до ее прихода в горн.

9. Наиболее полное использование газа можно обеспечить лишь при равномерном распределении шихты и газа, однако это возможно только при загрузке в печь однородного по крупности, не содержащего мелочи агломерата.

10. Получены новые и уточненные данные о ходе процессов. Установлено, что противоток газов и шихты в нижней зоне печи нарушается: около половины газифицированного кислорода шихты из гребня переносится газами в осевое и периферийное сечения. Доказано, что ступенчатое восстановление железа обусловлено не кинетическими, а термодинамическими факторами. Восстановление не замедляется в зоне замедленного теплообмена.

11. Разработан метод реконструкции процессов в доменной печи, основанный на расчетах радиального распределения газов и многосонных материальных и тепловых балансов, впервые выполненных отдельно по кольцевым сечениям. Метод позволил впервые создать единую картину взаимосвязанных процессов во всем объеме печи и на ее основе получить и интерпретировать новые данные о массо- и теплообмене.

12. Теоретически установлено, что выравнивание значений кажущихся теплоемкостей газа W_T и шихты $W_{ш}$ на границе верхней и нижней

ступеней теплообмена и температура t_0 на ней определяются не частной причиной — началом прямого восстановления при 900°C , как обычно полагают, а более общими факторами: соотношением массопотоков газа и шихты и обусловленным им изменением W_T и $W_{ш}$ по высоте кольцевых сечений.

13. Экспериментально установлено, что витальгия газов уменьшается неравномерно и, как следствие, кажущаяся теплоемкость газов W_T не постоянна, как принято считать; теоретически обосновано закономерное уменьшение ее в зоне наиболее интенсивного массообмена при температурах $1300-700^\circ\text{C}$.

В соответствии с полученными новыми данными уточнены температурно-тепловая диаграмма и общая схема теплообмена, отражающие самые общие закономерности доменного процесса.

14. Теоретически установлено, что при неравномерном радиальном распределении газов неизбежны перетоки их из одних сечений в другие. Доказана необходимость учета перетоков газов, а также всех значительных по массе- и теплоемкости промежуточных и циклических процессов при расчетах расхода кокса по зональным балансам и в кинетико-математических моделях. С учетом этого определены близкие к фактическим значения коэффициентов теплопередачи для верхней и нижней зон печи — от 0,5 до $1,2 \text{ кВт/К.м}^2$.

15. Данные реконструкции подтверждают основное положение теории теплообмена Б.И. Китаева о незначительной разнице температур газа и шихты на границе ступеней теплообмена.

16. Экспериментально и по данным реконструкции установлено, что 74 % всего кислорода прямого восстановления отнимается от шихты, проходящей через плохо проницаемые для газов сечения гребня. Таким образом сечение гребня является критическим, газопроницаемость которого определяет степень прямого восстановления Γ_d в целом для доменной печи. Это не соответствует теоретическим представлениям, в соответствии с которыми Γ_d определяется общим выходом газов. Эти представления верны для идеализированной доменной плавки с равномерным распределением шихты и газа. В реальной плавке влияние на Γ_d оказывает не столько общий выход газов, сколько количество газа, проходящего через сечения, где сосредоточен агломерат.

17. Выполненные экспериментальные и теоретические исследования показывают, что ход и результаты проходящих в доменной печи процессов, в том числе относительный расход кокса, при прочих рав-

ных условиях в основном определяются степенью равномерности распределения агломерата, кокса и газов, зависящей от качества агломерата — однородности по крупности и содержания мелочи. Улучшение гранулометрического состава агломерата позволило бы выровнять распределение газа, обеспечить термодинамически предельное его использование и снизить степень прямого восстановления и удельный расход кокса до минимально возможного уровня.

18. Выполненными впервые на народно-хозяйственном уровне расчетами показано, что снижение содержания мелочи в агломерате является самым выгодным способом снижения расхода кокса и, в отличие от всех других, энергосберегающим, позволяющим экономить кокс не за счет замены его другими видами топлива или дополнительного расхода тепла, а за счет улучшения распределения и использования газов.

19. В отсутствие средств для радикального улучшения качества шихты Донничерметом разработан и запатентован не требующий затрат способ более рационального использования и подготовки к плавке агломерата и кокса, производимых в отрасли. Газодинамическими опытами обоснована целесообразность уменьшения нижнего предела их крупности в 1,5–2,5 раза против стандартных норм при одновременном полном удалении из них пылеватых фракций. Для такого способа классификации шихтовых материалов разработаны технические средства, которые изготавливаются для всей отрасли Донничерметом. В 1989–1991 г.г. способ внедрен на металлургических комбинатах им. Ильича, "Азовсталь", Макеевском, "Запорожсталь", Ново-Липецком, заводах Донецком, Енакиевском (частично по подготовке агломерата — на "Криворожстали"). Это позволяло с 1990–1991 г.г. использовать в плавке агломерат крупностью более 2,5–3,0 мм (против 5–6 мм по стандарту), кокс крупностью более 15–17 мм (вместо 25–32 мм) и увеличивать выход скипового агломерата на 2–4 %, а скипового кокса — на 1,1–1,9 %.

20. Учетный до 1991 г. экономический эффект от внедрения разработок диссертации составляет 10,2 млн. руб. в ценах соответствующих периодов времени. Эффективность отраслевого внедрения способа классификации шихтовых материалов определена в натуральной форме и за период 1992–1994 г.г. выражается в увеличении количества скипового кокса в доменном производстве Украины в среднем на 160 тыс. т в год и скипового агломерата на 440 тыс. т. — без увеличения производства товарного кокса и агломерата.

Материалы диссертации опубликованы в

- моно- - Бугаев К.М. Распределение газов в доменных печах.-
 графии М.: Металлургия, 1974 - 175 с. с ил.
 книгах - Металлургия черных металлов /К.М.Бугаев, Ю.П.Бычков,
 Ю.В.Коновалов и др.-М.:Металлургия, 1969- 216 с. с ил.
 - Iron and Steel production /К. Bugaev, Y. Bychkov,
 Y. Kovalov, V. Kovalenko, E. Tretukov.- Moscow:
 Mir Publishers, 1971- 246 p.

статьях, авторских свидетельствах, патентах:

4. Бугаев К.М. и Уткин Г.Л. О распределении дутья и природного газа по фурмам доменной печи.- Металлургия чугуна: Науч. тр. /Донничермет, вып.3, М.:Металлургия, 1966, с.146-154.
5. Работа доменной печи на грохоченом агломерате /В.И.Литвиненко, В.А.Долматов, К.М.Бугаев и др. //Бюллетень ЦИИЧМ.-1967. - №21(569).- с.39-40.
6. Исследование распределения материалов перед задувкой доменной печи полезным объемом 2300 м³ /Н.И.Красавцев, К.М.Бугаев, Н.С.Мазуркевич и др.- Сталь, 1968, № 2, с.106-111.
7. Бугаев К.М. Некоторые вопросы формирования газовой фазы в доменной печи.- Металлургическая и горнорудная промышленность, 1968, № 1, с.4-8.
8. Исправление профиля мощной доменной печи. /В.И.Литвиненко, М.Л.Лаврентьев, К.М.Бугаев и др.- Металлургическая и горнорудная промышленность, 1968, №3, с.6-8.
9. Влияние режима сжигания природного газа на горение фурм доменной печи. /И.П.Семик, К.М.Бугаев, Г.Л.Уткин и др.- Сталь, 1968, №6, с.490-493.
10. АС 240721 (СССР). Способ контроля распределения природного газа в фурменной зоне доменной печи /К.М.Бугаев, Ю.П.Беляев, В.П.Осадчий и др.- Не публиковалось. Зарегистрировано в Госреестре СССР 22.01.1969 г.
11. Исследование взаимодействия потоков дутья и природного газа в воздушной фурме доменной печи. /К.М.Бугаев, Н.С.Мазуркевич, С.Я.Фролов и др.- Металлургия чугуна: Науч. тр. /Донничермет, вып.8, М.:Металлургия, 1969, с.60-73.
12. Задувка доменной печи полезным объемом 2300 м³ на Ждановском металлургическом заводе /Н.И.Красавцев, В.И.Литвиненко, К.М.Бугаев и др.- Металлургия чугуна: Науч. тр. /Донничермет, вып.8, М.:Металлургия, 1969, с.52-60.

13. Исследование газового потока при работе доменной печи полезным объемом 2300 м³ на комбинированном дутье /К.М.Бугаев, Н.С.Мазуркевич, С.Я.Фролов и др.— *Металлургия чугуна: Науч. тр./Донничермет*, вып.8, М.:Металлургия, 1969, с.84-102.

14. Бугаев К.М. К вопросу о пиролизе природного газа в доменной печи.— *Металлургия чугуна: Науч. тр. /Донничермет*, вып.8, М.:Металлургия, 1969, с.123-124.

15. Методика исследования распределения природного газа и продуктов его пиролиза и окисления по сечению доменной печи с помощью радиоактивных изотопов /К.М.Бугаев, Ю.П.Беллев, И.Г.Подольский и др.— *Металлургия чугуна: Науч. тр. /Донничермет*, вып.8, М.:Металлургия, 1969, с.247-252.

16. Методика исследования интенсивности газового потока по сечению верхнего горизонта шахты доменной печи с помощью радиоактивных изотопов /К.М.Бугаев, И.П.Семик, Ю.П.Беллев и др.— *Металлургия чугуна: Науч. тр. /Донничермет*, вып.12, М.:Металлургия, 1969, с.74-85.

17. Бугаев К.М. О влиянии размеров зон горения и газораспределения на сход шихты и использование энергии газов.— *Металлургия чугуна: Науч. тр. /Донничермет*, вып.12, М.:Металлургия, 1969, с.93-105.

18. Исследование восстановительной работы газов в доменной печи большого объема /К.М.Бугаев, Н.С.Мазуркевич, С.Я.Фролов и др.— *Металлургия чугуна: Науч. тр. /Донничермет*, вып.12, М.:Металлургия, 1969, с.106-124.

19. Некоторые особенности работы мощной доменной печи Елановского завода им.Ильича на основных магнезиальных шлаках. /Н.С.Мазуркевич, В.И.Литвиненко, К.М.Бугаев и др.— *Металлургия чугуна: Науч. тр./Донничермет*, вып.12, М.:Металлургия, 1969, с.124-129.

20. АС 290045 (СССР). Фурма для подачи воздуха и газообразного реагента в доменную печь /К.М.Бугаев, И.П.Семик, С.Я.Фролов и др.— *Опубл. в БИ*, 1971, №2.

21. Исследование процессов восстановления в доменной печи полезным объемом 2300 м³ /К.М.Бугаев, Н.С.Мазуркевич, В.П.Овдчий и др.— *Металлургия чугуна: Науч. тр./Донничермет*, вып.24, Донецк, 1971, с.87-108.

22. Исследование циркуляции материалов в фурменных зонах /В.Н.Андронов, К.М.Бугаев, Б.М.Граховский и др.— *Металлургия чугуна: Науч. тр./Донничермет*, вып.24, Донецк, 1971, с.116-126.

23. Некоторые особенности фазовых превращений железа и распределения газов в доменной печи. /К.М.Бугаев, Н.С.Мазуркевич, В.П.Осадчий и др.— Новое в аглодоменном производстве: Науч.тр./Донничермет, Донецк: Областное изд-во, 1973, с.173-184.

24. Исследование хода восстановления в доменной печи объемом 2300 м³ в связи с распределением шихтовых материалов и газов /К.М.Бугаев, Н.С.Мазуркевич, В.П.Осадчий и др.— Новое в аглодоменном производстве: Науч.тр./Донничермет, Донецк: Областное изд-во, 1973, с.185-201.

25. Бачинин А.А., Бугаев К.М. О связи производительности доменной печи с ее размерами.— Новое в аглодоменном производстве: Науч.тр./Донничермет, Донецк: Областное изд-во, 1973, с.241-250.

26. Некоторые закономерности процессов восстановления в доменных печах большого объема /К.М.Бугаев, Н.С.Мазуркевич, В.П.Осадчий и др.— Проблемы автоматизированного управления доменным производством с применением средств вычислительной техники: Науч.тр./ДНИИ и ТЭИ приборостроения, вып.2, М.:Металлургия, 1971, с.73-94.

27. АС 384869 (СССР). Шахтная обжиговая печь /Б.М.Граховский, В.Н.Андронов, К.М.Бугаев и др.— Опубл. в БИ, 1973, № 25.

28. Улучшение показателей доменной плавки применением комбинированного дутья с повышенными расходами компонентов. /Г.А.Белевцов, В.В.Касьян, К.М.Бугаев и др.— Сталь, 1974, №9, с.786-789.

29. Совместное использование мазута и природного газа в доменной плавке. /А.А.Ткаченко, К.М.Бугаев, А.А.Бачинин и др.— Сталь, 1974, № 6, с.481-488.

30. О перспективах внедрения технологии доменной плавки с совместным или раздельным вдуванием мазута и природного газа. /К.М.Бугаев, В.Н.Никифоров, А.А.Бачинин и др.— Metallurgical and Iron-making Industry, 1975, № 4, с.3-5.

31. Анализ эффективности вдувания горячих восстановительных газов в горн доменной печи /Н.Б.Карпиловский, Л.А.Бялый, К.М.Бугаев и др.— В сб.:Производство чугуна: Науч.тр./МГМИ, вып.14, Магнитогорск: Книжное изд-во, 1975, с.27-34.

32. Окисление природного газа в фурменной зоне доменной печи при различных параметрах комбинированного дутья /К.М.Бугаев, В.С.Льбимов, А.Т.Анисимов и др.— Metallurgical and Iron-making Industry, 1977, № 1, с.5-7.

33. Исследование факела горения мазута в фурме доменной плавки /А.Г.Попов, К.М.Бугаев, А.Я.Воробьев и др.- Металлург, 1977, № 7, с.15-18.

34. АС 616283 (СССР). Способ ведения доменной плавки./Н.И. Красавцев, В.А.Ванчиков, К.М.Бугаев и др.- Оpubл. в БИ, 1978, №27.

35. Анализ аварий в доменных цехах и мероприятия по их предупреждению /В.Г.Антипин, Н.И.Савелов, Ю.П.Волков, К.М.Бугаев и др.//Экспресс-информация ЦИИ ЧМ.(№21). Москва, 1983.

36. Некоторые вопросы технического прогресса аглодоменного производства и повышения его технико-экономической эффективности /Ванчиков В.А., Бугаев К.М., Колесанов Ф.Ф.- В сб.:Теория и практика современного доменного производства. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции. Днепропетровск:1983, с.3-4.

37. АС 1174477 (СССР). Способ ведения доменной печи /В.С.Любимов, А.Г.Попов, Г.В.Варшавский, К.М.Бугаев и др.- Оpubл. в БИ, 1985, № 31.

38. Экономические и организационные проблемы снижения расхода кокса в доменном производстве /С.Т.Плискановский, С.С.Аптекарь, К.М.Бугаев и др.- Сталь, 1985, № II, с.13-16.

39. Влияние распределения дутья по фурмам на газовый поток в доменной печи /К.М.Бугаев, В.М.Антонов, А.Д.Гречихин и др.- Сталь, 1987, № 2, с.17-22.

40. Применение термовоздов для контроля распределения газов в доменной печи /Н.Д.Прядко, В.И.Малкин, К.М.Бугаев и др.-Металлург, 1988, № 12, с.24-25.

41. Бугаев К.М. Газификация твердого топлива в доменных печах.- В сб.:Новые процессы в черной металлургии. Доклады заседаний научного совета ГКНТ СССР. Москва.:Черметинформация, 1990, с.3-9.

42. АС 1654341 (СССР). Способ классификации шихтовых материалов /В.С.Любимов, К.М.Бугаев, В.М.Антонов и др.- Оpubл. в БИ, 1991, № 21.

43. Бугаев К.М. Достоверность результатов расчета зональных балансов доменной плавки.- Металлургическая и горнорудная промышленность, 1991, № 4, с.28-30.

44. Увеличение выхода скипового кокса на 1-2 % путем снижения его крупности до 20-15 мм с одновременным уменьшением его замусоренности /К.М.Бугаев, А.А.Бачинин, Г.Б.Рабинович и др.-Сталь, 1992, № 9, с.14.

45. Повышение газопроницаемости скипового агломерата без увеличения количества отсеваемой от него мелочи /К.М.Бугаев, А.А.Бачинин, А.А.Третяк и др.- Сталь, 1992, № 9, с.15.

46. Патент Украины № 1590. Способ классификации шихтовых материалов /В.С.Любимов, К.М.Бугаев, В.М.Антонов и др.-Регистр. 15.10.93 р.

47. Рациональная подготовка агломерата и кокса к доменной плавке /К.М.Бугаев, В.С.Любимов, Г.В.Варшавский и др.- В сб.:Теория и технология аглодоменного производства: Труды Международной научно-технической конференции. Днепропетровск: Изд.ГМетАУ, 1995, с.143-145.

48. Бугаев К.М. Развитие прямого восстановления в доменной печи.- В сб.:Теория и технология аглодоменного производства; Труды Международной научно-технической конференции. Днепропетровск: Изд.ГМетАУ, 1995, с.10-12.

А Н О Т А Ц І Я

Бугаєв К.М. Розподіл і робота газу в доменній печі і шляхи їх поліпшення.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.16.02. - металургія чорних металів. Донецький державний технічний університет, Донецьк, 1996 р. Рукопис 345 с., (51 табл., 73 рис., бібліогр. з 310 назв).

Містить результати експериментальних та теоретичних досліджень факторів, впливаючих на формування, розподіл, відновлювальну і теплову роботу газового потоку і відносну витрату коксу. Встановлено, що хід і результати процесів, які проходять в доменній печі при інших рівних умовах визначаються ступенем рівномірності розподілу шихтових матеріалів і газів, який залежить від гранулометричного складу агломерату, поліпшення якого є найбільш вигідним способом зниження витрати коксу. Наводяться дані про ефективність розробленого та запровадженого в галузі способу раціональної підготовки агломерату і коксу до плавки.

Ключові слова: доменний процес, розподіл газу, температура, відновлювання, теплообмін, витрата коксу.

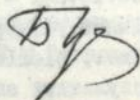
SUMMARY

Bugayev K.M. Distribution and Utilization of Gas in the Blast Furnace and the Means for Improvement them.

Thesis of doctor's degree (engineering), specialization - 05.16.02 - ferrous metallurgy, Donetsk State Technical University, Donetsk, 1996. Manuscript.- 345 p., including 51 tables, 73 figures and 310 references.

The work is results of the theoretical and experimental researches of the factors that influence on forming, distribution and the reducing and thermal work of gas flow and coke rate. It was established that under otherwise identical conditions the results of blast furnace process are conditioned by the burden and gas distribution that are depended on granular composition of agglomerate. Improving of the last one are the most profitable means to diminish the coke consumption. There are represented data about the efficiency of the means of the rational preparation of agglomerate and coke that was developed and introduced into the blast furnace practice.

The key words: blast furnace process, gas distribution, temperature, reduction, heat exchange, coke rate.



Подписано к печати 8.02.96 г. Заказ 31, тираж 120

Ротапринт Доннигчермет

AB 34.120