

На правах рукописи

БЕЛОВ ЮРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ ПРИ
ВНЕДРЕНИИ НОВЫХ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Специальность 05.16.02 - Metallургия черных, цветных и редких металлов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт Петербург
2003

Работа выполнена в ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”

Научный руководитель

доктор технических наук,
профессор

Валерий Николаевич Андронов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор,
главный специалист группы качества
доменного производства ОАО “Северсталь”

Павел Григорьевич Русаков

кандидат технических наук,
доцент

Юрий Павлович Смирнов

Ведущая организация :

АООТ “ЛЕНГИПРОМЕЗ”

Защита диссертации состоится “ ____ ” _____ 2003 г. в ____ час. ____ мин. на заседании диссертационного совета Д. 212. 229. 14 в ГОУ ВПО “Санкт - Петербургский государственный политехнический университет” по адресу: 195251, г. С.- Петербург, Политехническая ул., 29, СПбГПУ, химический корпус, ауд. 51.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный политехнический университет”.

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2003 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д.212.229.14, д.т.н, профессор

Сергей Юрьевич Кондратьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Выбросы вредных веществ в окружающую среду предприятиями черной металлургии составляют около 20 % от выбросов всей промышленности. Основная доля этих вредных выбросов приходится на коксохимическое и агломерационное звенья доменного производства. Вот почему обозначенные в работе мероприятия по дальнейшему сокращению удельного расхода кокса решают не только экономические, но и экологические проблемы отрасли. Что же касается агломерационного производства, то эту проблему предлагается решить кардинально - путем закрытия всех аглофабрик и перевода печей на работу по уникальной безотходной технологии с использованием в шихте 100 % офлюсованных окатышей, производство которых на порядок менее токсично по сравнению с агломератом (при этом все железосодержащие отходы производства утилизируются путем вдувания их в горн доменных печей).

Цель работы

Цель работы заключается в обосновании технической возможности и целесообразности реализации новых и усовершенствования современных доменных технологий, существенно снижающих экологическую нагрузку на окружающую среду.

Метод исследования

В работе использован аналитический метод исследований. После анализа основных используемых в настоящее время методов расчета плавки в качестве базового выбран метод ПДК, предложенный проф. В.Н. Андроновым, и предполагающий вычисление минимально возможных значений расхода кокса (K_{\min}) и степени прямого восстановления железа в печи ($r_{d_{\min}}$). Этот метод расчета основан на идее М.А. Павлова о дифференциации функций углерода кокса как источника тепла и восстановителя, на предложении Джонсона учитывать температурный потенциал тепла, необходимого для протекания тех или иных эндотермических реакций, т.е. использовать при расчетах зональные тепловые балансы, приобретенные, в свою очередь, строгие формы благодаря разработанной проф. Б.И. Китаевым теории теплообмена в доменной печи. Кроме того, в методе ПДК учитывается подтвержденная на практике гипотеза Ж. Мишара о потоколимитируемом режиме косвенного восстановления на стадии вюстит-железо, и для расчета углерода кокса как

источника восстановителя используются константы равновесия реакций восстановления FeO монооксидом углерода и водородом при температурах завершеного теплообмена в нижней зоне печи (около 900 °С).

На защиту выносятся:

1. Усовершенствованный метод прогнозного расчета основных параметров доменной плавки, уточняющий оценку влияния различных факторов на относительный расход кокса.

2. Оценка экономии относительного расхода кокса при вводе в эксплуатацию систем автоматического регулирования расходами дутья и природного газа по фурмам доменной печи.

3. Предложение по утилизации железосодержащих отходов текущего производства путем вдувания их непосредственно в горн доменной печи при ликвидации на меткомбинатах аглопроизводства и переводе печей на работу с металлошихтой, содержащей до 100 % окатышей.

4. Возможность снижения критического расхода кокса по условию фильтрации жидких продуктов плавки через коксовую насадку при вдувании в горн железосодержащих отходов (добавок).

5. Предложение по снижению относительного расхода кокса (на доменных печах, работающих с вдуванием природного газа) в результате повышения его реакционной способности при сохранении горячей прочности.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит в разработке усовершенствованной методики прогнозных расчетов основных показателей доменной плавки. Метод ПДК адаптирован на реальные условия доменной плавки (ПДК2), т.е. в отличие от базового метода (ПДК1), усовершенствованный метод расчета учитывает тот факт, что часть восстановительных газов (δ) не участвует в восстановлении вюстита и бесполезно сбрасывается через центральную коксовую отдушину. Практическое совпадение прогнозных (расчетных) и достигнутых на практике показателей работы печей ОАО “Северсталь” (расход кокса, температура колошниковых газов и др.) свидетельствует о высокой точности усовершенствованного метода расчета (ПДК2). Кроме того, в работе обозначен путь снижения критического расхода кокса по условию фильтрации жидких продуктов в зоне плавления, а также дана количественная оценка эффективности повышения реакционной способности кокса.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы заключается в уточненном прогнозе показателей плавки при освоении новых и усовершенствовании уже существующих технологий: при работе печей на шихте, содержащей 100 % железорудных окатышей, с одновременным вдуванием в горн железосодержащих отходов текущего производства, при внедрении в производство систем автоматического распределения дутья и дополнительных топлив по фурмам печи, при использовании в шихте кокса с повышенной реакционной способностью. Уточненная оценка влияния различных факторов на относительный расход кокса рекомендуется для практического использования на заводах отрасли.

Апробация работы

Результаты работы были представлены и обсуждались на семинарах кафедры “Стали и сплавы”, а также на конференции “XXVIII неделя науки СПбГТУ”, С-Петербург, 1999 г.; на V всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы “Фундаментальные исследования в технических университетах”, С-Петербург, июнь 2001 г; на VI всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы “Фундаментальные исследования в технических университетах”, С-Петербург, июнь 2002 г; на VII международном конгрессе специалистов доменного производства, Москва - Череповец, сентябрь 2002 г; на конференции специалистов доменного производства, посвященной 100 - летию со дня рождения А.Н. Рамма.

Публикации

Основные положения диссертации опубликованы в 10 печатных работах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 163 страницах, содержит 17 рисунков и 25 таблиц. Список литературы состоит из 92 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются ее цель и основные задачи.

Глава 1. Аналитический обзор существующих технологий и методов расчета доменной плавки. Постановка задач исследования.

В главе приводится аналитический обзор в котором рассматриваются основные способы кардинального улучшения экологической обстановки на металлургических комбинатах. Рассмотрены возможности реализации технологии плавки, предполагающей полное закрытие аглофабрик (вдувание в горн железосодержащих отходов текущего производства и использование в металлошихте доменных печей до 100 % окатышей), а также попытки практической реализации технологий, направленных на дальнейшее сокращение расхода кокса в доменной плавке. Кроме того, в главе рассмотрены методы расчета основных показателей плавки, позволяющих оценивать экономическую эффективность указанных технологий.

Глава 2. Метод расчета.

В настоящее время для прогноза показателей доменной плавки используется широко известный за рубежом метод расчета Риста-Писи-Давенпорта (РПД), основанный на балансе тепла нижней зоны печи и учитывающий заверченный теплообмен в этой зоне, а также потоколимитируемый режим смешанного восстановления вюстита. Поскольку оба метода базируются на общих фундаментальных положениях химической термодинамики и теории теплообмена в доменной печи проф. Китаева Б.И., то результаты прогнозных расчетов $\gamma_{d_{min}}$ и K_{min} по ним идентичны, если привести исходные данные к одинаковым условиям (по температурам на границе зон, по значениям константы равновесия реакций и т.п.).

Предельно идеализированные условия расчета расхода кокса предполагают, естественно, заметное преуменьшение K_{min} против реального K_i . Основной причиной заметного превышения K_i над K_{min} является, по мнению проф. Андропова В.Н., органически присущий всем доменным печам недостаток - периферийный подвод дутья, обуславливающий необходимость формирования в осевой зоне столба шихты центральной коксовой отдушины (ЦКО), позволяющей фурменным газам проникать к оси горна, предотвращая образование там "мертвой" зоны, названной немецкими доменщиками "тотерманом". Через ЦКО сбрасывается часть горячих горновых газов (δ), в существенно

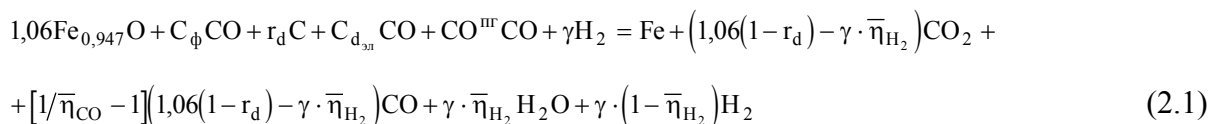
меньшей степени участвующих в массо- и теплообменных процессах, чем основной поток газов.

Доля теряемого через ЦКО восстановителя (CO и H₂) - это “чистая” потеря восстановителей для потоколимитируемого восстановления вюстита основного столба материалов, т.е. при этом учитывается доля газов ЦКО, не содержащих ни CO₂, ни H₂O, полагая, что оставшаяся часть газов ЦКО используется точно также, как и газ основного потока. Доля потерянного тепла газов ЦКО - это лишь частичная потеря, т.к. часть тепла, причем весьма значительная, утилизируется в нижней ступени теплообмена. Потери тепла с газами ЦКО выражены в долях от прихода тепла в зоне горения, т.е. так же, как они определены для Q_{C_φ} (или q_{C_φ}), но без предварительного нормирования (для q_{C_φ} обычно z = 0,08 - 0,12 при расчете по общему тепловому балансу и 0,7z для баланса нижней ступени теплообмена).

Поскольку потери тепла с газами ЦКО выражены через долю тепла (z_{отд}), развиваемого в зоне горения углерода кокса и углерода топливной добавки, нет необходимости делать какие-либо предположения о их температуре на границе зон теплообмена и температуре кокса, поступающего из ЦКО в зону горения. Для унификации доли тепла, теряемого газами ЦКО, приход тепла в зоне оставлен неизменным, т.е. будем считать теплосодержание углерода кокса, поступающего в нижнюю ступень теплообмена при t = t_н (t_н = 900 °C), пренебрегая действительной картиной теплообмена в ЦКО. Потери восстановителя и тепла по-разному влияют на показатели C_к^B и C_к^T.

На примере конкретных условий плавки переловного чугуна на доменной печи ОАО “Северсталь” объемом 5,5 тыс. куб. м, работающей в режиме комбинированного дутья, т.е. использующей в качестве топливной добавки природный газ и обогащение дутья технологическим кислородом, продемонстрирована схема расчета δ и z_{отд}.

Алгоритм расчета выводится из реакции смешанного восстановления Fe_{0,947}O в потоколимитируемом режиме:



где γ - приход водорода с природным газом и влагой дутья:

$$\gamma = [\phi V'_d C_{\phi} + \text{H}_2^{\text{III}}], \text{ моль/моль Fe};$$

$\text{CO}^{\text{пр}}$ и $\text{H}_2^{\text{пр}}$ - количества, CO и H_2 из топливной добавки (природного газа), а также водорода влаги дутья, расходуемого на горение углерода природного газа

V'_d и \bar{V}_d - расход дутья, моль/моль C_ϕ или $\text{м}^3/\text{м}^3$ природного газа;

ω и ϕ - содержание кислорода в дутье и влажность дутья, моль/моль сух. дутья.

Из баланса углерода реакции (2.1) получено следующее выражение:

$$\text{C}_\phi + r_d + \text{C}_{d_{\text{зн}}} + \text{CO}^{\text{пр}} + \left[\phi V'_d \text{C}_\phi + \text{H}_2^{\text{пр}} \right] \frac{\bar{n}_{\text{H}_2}}{\bar{n}_{\text{CO}}} = \frac{1,06(1-r_d)}{\bar{n}_{\text{CO}}} \quad (2.2)$$

Или, учитывая, что $\text{C}_k^{\text{в}} = \text{C}_\phi + r_d + \text{C}_{d_{\text{зн}}}$, запишем уравнение (2.2) с учетом влияния

$$\text{ЦКО: } (1-\delta) \left\{ \text{C}_k^{\text{в}} \left[1 + \phi V'_d \cdot \left(\frac{\bar{n}_{\text{H}_2}}{\bar{n}_{\text{CO}}} \right) \right] + \left[\text{CO}^{\text{пр}} + \text{H}_2^{\text{пр}} \left(\frac{\bar{n}_{\text{H}_2}}{\bar{n}_{\text{CO}}} \right) \right] - \phi V'_d (r_d + \text{C}_{d_{\text{зн}}}) \left(\frac{\bar{n}_{\text{H}_2}}{\bar{n}_{\text{CO}}} \right) \right\} = \frac{1,06(1-r_d)}{\bar{n}_{\text{CO}}} \quad (2.3)$$

$$\text{Откуда} \quad \delta = 1 - \frac{1,06(1-r_d)}{\bar{n}_{\text{CO}}} \cdot \frac{1}{A}, \quad (2.4)$$

где A - выражение в фигурных скобках формулы (2.3).

Из уравнения (2.3) определяется расход углерода кокса как источника восстановителя:

$$\text{C}_k^{\text{в}} = \left\{ 1,06 \cdot (1-r_d) / \left[\bar{n}_{\text{CO}}(1-\delta) \right] - \left[\text{CO}^{\text{пр}} + \text{H}_2^{\text{пр}} \left(\frac{\bar{n}_{\text{H}_2}}{\bar{n}_{\text{CO}}} \right) \right] + \phi V'_d (1,06r_d + \text{C}_{d_{\text{зн}}}) \left(\frac{\bar{n}_{\text{H}_2}}{\bar{n}_{\text{CO}}} \right) \right\} / \left[1 + \phi V'_d \cdot \left(\frac{\bar{n}_{\text{H}_2}}{\bar{n}_{\text{CO}}} \right) \right] \quad (2.5)$$

Тепловой баланс нижней зоны:

$$\begin{aligned} & \text{C}_\phi Q_{\text{C}_\phi} + J_{\text{C}} \cdot (\text{C}_{d_{\text{зн}}} + 1,06 \cdot r_d) + J_{\text{O}} \cdot (\text{O}_{d_{\text{зн}}} + 1,06) = \text{C}_{\text{ид}} \cdot Q_{\text{C}_\phi} + 1,06 \cdot \Delta H_{\text{вюст}} \cdot r_d - n'_{\text{пр}} \cdot Q_{\text{пр}} - \\ & - \Delta H_{\text{вюст}}^{\text{H}_2} \cdot 1,06 \cdot (1-\alpha_{\text{H}})(1-r_d) - \Delta H_{\text{вюст}}^{\text{CO}} \cdot 1,06 \cdot \alpha_{\text{H}} \cdot (1-r_d) + J_{\text{CO}} \cdot (1,06 \cdot r_d + \text{C}_{d_{\text{зн}}}) \cdot (1-\delta) \cdot (1-\bar{n}_{\text{CO}}) + \\ & + J_{\text{CO}_2} \cdot 1,06 \cdot (1-r_d) \alpha_{\text{H}} + J_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 1,06 \cdot (1-r_d)(1-\alpha_{\text{H}}) + Q_{Z_{\text{отд}}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

где $\text{O}_{d_{\text{зн}}}$ - расход кислорода оксидов примесей (Si, Mn, P, S) чугуна, моль/моль Fe.

$\Delta H_{\text{вюст}}$, $\Delta H_{\text{вюст}}^{\text{CO}}$ и $\Delta H_{\text{вюст}}^{\text{H}_2}$ - тепловые эффекты соответственно реакций прямого а также косвенного восстановления вюстита водородом и CO, Дж/моль Fe (Дж/моль O); ($\Delta H_{\text{вюст}}^{\text{H}_2} = -23000$ и $\Delta H_{\text{вюст}}^{\text{CO}} = 18000$);

$n'_{\text{пр}}$ - расход природного газа, $\text{м}^3/\text{моль Fe}$;

$$\alpha_{\text{H}} = 1 / \left(1 + \frac{\bar{n}_{\text{H}_2}}{\bar{n}_{\text{CO}}} \cdot \frac{V_{\text{H}_2}^{\Sigma}}{V_{\text{CO}}^{\Sigma}} \right) - \text{доля кислорода непрямого восстановления } (\alpha_{\text{H}}), \text{ отнимаемая окисью}$$

углерода в нижней зоне печи;

($V_{\text{H}_2}^{\Sigma}$ и V_{CO}^{Σ} - суммарные количества H_2 и CO (моль/моль Fe), поступающих в доменную печь (или образующихся в ней))

$J_C, J_O, J_{CO}, J_{CO_2}, J_{H_2O}$ - теплосодержания, соответственно, C, O, CO, CO₂ и H₂O на границе зон (т.е. при 900°C).

Величины теплоотдач углерода кокса (Q_{C_ϕ} , Дж/моль) и природного газа ($Q_{пг}$, Дж/моль), сгорающих на фурмах, а также теплотери с газами в ЦКО ($Q_{z_{отд}}$, Дж/моль Fe)

$$Q_{C_\phi} = (1-z) \left(w_C + J_C + J_d \cdot V'_d \right) - J_r \cdot V'_r \cdot (1-\delta); \quad (2.7)$$

$$Q_{пг} = (1-z) \left(w_{пг} + J_d \cdot \bar{V}_d \right) - J_r \cdot \bar{V}_r \cdot (1-\delta); \quad (2.8)$$

$$Q_{z_{отд}} = z_{отд} \cdot \left\{ \left(w_C + J_C + J_d \cdot V'_d \right) \cdot C_\phi + n'_{пг} \cdot \left(w_{пг} + J_d \cdot \bar{V}_d \right) \right\}; \quad (2.9)$$

где J_d - теплосодержание дутья за вычетом теплоты разложения влаги, Дж/моль сух. дутья.

Из (2.6) с учетом (2.9) определяем $z_{отд}$:

$$z_{отд} = \frac{A}{\left(w_C + J_C + J_d \cdot V'_d \right) C_\phi + n'_{пг} \left(w_{пг} + J_d \cdot \bar{V}_d \right)} \quad (2.10)$$

где $A = Q_{C_\phi} \left(C_\phi - C_{ид} \right) - 1,06 \cdot \Delta H_{вюст} \cdot r_d + n'_{пг} \cdot Q_{пг} + J_C \left(1,06 r_d + C_{d_{зп}} \right) + J_O \left(O_{d_{зп}} + 1,06 \right) + 1,06 \cdot \Delta H_{вюст}^{H_2} \left(1 - \alpha_H \right) \left(1 - r_d \right) +$
 $+ 1,06 \cdot \Delta H_{вюст}^{CO} \cdot \alpha_H \left(1 - r_d \right) - J_{CO} \left(1,06 \cdot r_d + C_{d_{зп}} \right) \left(1 - \delta \right) \left(1 - \bar{n}_{CO} \right) - J_{CO_2} \cdot \alpha_H \cdot 1,06 \cdot \left(1 - r_d \right) - J_{H_2O} \cdot \left(1 - \alpha_H \right) \cdot 1,06 \cdot \left(1 - r_d \right)$

Расход углерода кокса как источника тепла рассчитан по следующей зависимости:

$$C_k^r = C_{ид} + 1,06 \cdot \frac{\Delta H_{вюст}}{Q_{C_\phi}} \cdot r_d + \frac{J_{CO} \cdot \left(1,06 \cdot r_d + C_{d_{зп}} \right) \cdot \left(1 - \delta \right) \cdot \left(1 - \bar{n}_{CO} \right)}{Q_{C_\phi}} + \frac{J_{H_2O} \cdot 1,06 \cdot \left(1 - r_d \right) \cdot \left(1 - \alpha_H \right)}{Q_{C_\phi}} + \frac{J_{CO_2} \cdot 1,06 \cdot \left(1 - r_d \right) \cdot \alpha_H}{Q_{C_\phi}} +$$

$$+ \frac{J_{CO_2} \cdot 1,06 \cdot \left(1 - r_d \right) \cdot \alpha_H}{Q'_{C_\phi}} + \frac{\Delta H_{вюст}^{H_2} \cdot 1,06 \cdot \left(1 - r_d \right) \cdot \left(1 - \alpha_H \right)}{Q'_{C_\phi}} - \frac{\Delta H_{вюст}^{CO} \cdot 1,06 \cdot \left(1 - r_d \right) \cdot \alpha_H}{Q'_{C_\phi}} - n'_{пг} \cdot \frac{Q'_{пг}}{Q'_{C_\phi}} -$$

$$- \frac{J_C \left(C_{d_{зп}} + 1,06 \cdot r_d \right) + J_O \left(O_{d_{зп}} + 1,06 \right)}{Q'_{C_\phi}} + 1,06 \cdot r_d \quad (2.11)$$

где $Q'_{C_\phi} = \left(1 - z - z_{отд} \right) \left(w_C + J_C + J_d \cdot V'_d \right) - J_r \cdot V'_r \cdot (1-\delta)$

(2.12)

$$Q'_{пг} = \left(1 - z - z_{отд} \right) \left(w_{пг} + J_d \cdot \bar{V}_d \right) - J_r \cdot \bar{V}_r \cdot (1-\delta)$$

(2.13)

На графиках рис. 2.1 показано влияние вдувания в горн печи природного газа (CH_4) на показатели плавки ($C_{\text{к}_i}^{\text{г}}$ и $\gamma_{\text{д}_i}$) с учетом ЦКО, т.е. при адаптировании идеальной схемы расчета к реальным условиям плавки.

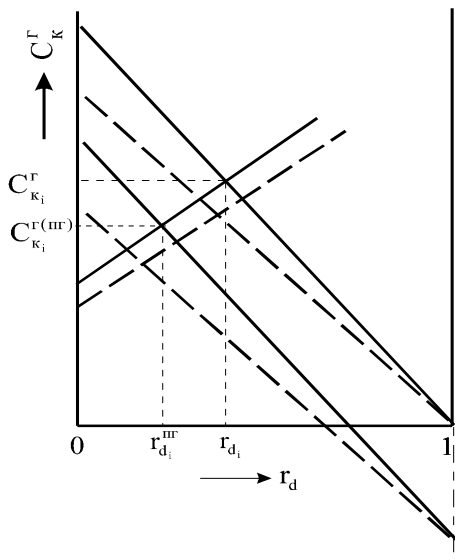


Рис. 2.1. Операционная диаграмма метода ПДК показывающая влияние вдувания в горн природного газа на расход газифицируемого углерода кокса и на $\gamma_{\text{д}}$ без учета ЦКО (пунктир) и с учетом ЦКО (сплошные линии). $C_{\text{к}_i}^{\text{г}}$ и $\gamma_{\text{д}_i}$ - расход газифицируемого углерода кокса и степень прямого восстановления Fe без природного газа, а $C_{\text{к}_i}^{\text{г}(\text{пр})}$ и $\gamma_{\text{д}_i}^{\text{пр}}$ - те же показатели при заданном расходе ПГ.

Расчет δ и $z_{\text{отд}}$ выполнен по данным работы доменной печи № 5 ОАО “Северсталь” в 1996 году. Состав чугуна (%): $[\text{C}]=4.87$, $[\text{Si}]=0.69$, $[\text{Mn}]=0.34$, $[\text{P}]=0.070$, $[\text{S}]=0.017$; состав кокса (%): зола кокса 11 %, летучие кокса 1 %, сера кокса 0.5 %; температура дутья 1178 °C; влажность дутья 8.9 г/м³; содержание O_2 в дутье 0.258 м³/м³ сух. дутья; расход природного газа 109 м³/т чугуна; температура чугуна 1488 °C; температура шлака 1538 °C; удельный расход сухого кокса 430 кг/т чугуна; состав сухого колошникового газа (%): $\text{CO} = 24.4$, $\text{CO}_2 = 19$; $\text{H}_2 = 7.1$.

Расчет показал, что $\delta = 0,1047$ и $z_{\text{отд}} = 0,1200$. Найденные значения δ и $z_{\text{отд}}$ использованы для прогнозных расчетов $\gamma_{\text{д}}$ и K при изменении интересующего нас параметра технологии (например, влияние φ , ω , n , $t_{\text{д}}$ и t_{CH_4}).

Приравнявая $C_{\text{к}}^{\text{б}}$ и $C_{\text{к}}^{\text{т}}$ (правые части уравнений (2.5) и (2.11)), найдено вначале $\gamma_{\text{д}}$, а затем и $C_{\text{к}}^{\text{г}}$ (K):

$$r_d = \frac{A}{B} \quad (2.14)$$

$$\text{где } A = \frac{1}{(1 + \varphi V'_d \cdot \bar{\eta}_{H_2} / \bar{\eta}_{CO})} \left[\frac{1,06}{\bar{\eta}_{CO}(1-\delta)} - CO^{пр} - H_2^{пр} + \varphi V'_d \cdot C_{d_{за}} \bar{\eta}_{H_2} / \bar{\eta}_{CO} \right] - C_{нд} - \frac{J_{CO} \cdot C_{d_{за}} (1-\delta)(1-\bar{\eta}_{CO})}{Q'_{C_\phi}} -$$

$$- \frac{J_{H_2O} \cdot 1,06 \cdot (1-\alpha_n)}{Q'_{C_\phi}} - \frac{J_{CO_2} \cdot 1,06 \cdot \alpha_n}{Q'_{C_\phi}} + \frac{\Delta H_{\text{выост}}^{H_2} \cdot 1,06 \cdot (1-\alpha_n)}{Q'_{C_\phi}} + \frac{\Delta H_{\text{выост}}^{CO} \cdot 1,06 \cdot \alpha_n}{Q'_{C_\phi}} + n'_{пр} \cdot \frac{Q'_{пр}}{Q'_{C_\phi}} + \frac{J_C \cdot C_{d_{за}} + J_O(1,06 + O_{d_{за}})}{Q'_{C_\phi}}$$

$$B = \frac{1}{(1 + \varphi \cdot V'_d \cdot \bar{\eta}_{H_2} / \bar{\eta}_{CO})} \left[\frac{1,06}{\bar{\eta}_{CO}(1-\delta)} - 1,06 \cdot \varphi V'_d \cdot \bar{\eta}_{H_2} / \bar{\eta}_{CO} \right] + \frac{1,06 \cdot \Delta H_{\text{выост}}}{Q'_{C_\phi}} + \frac{J_{CO} \cdot 1,06 \cdot (1-\delta)(1-\bar{\eta}_{CO})}{Q'_{C_\phi}} -$$

$$- \frac{J_{H_2O} \cdot 1,06 \cdot (1-\alpha_n)}{Q'_{C_\phi}} - \frac{J_{CO_2} \cdot 1,06 \cdot \alpha_n}{Q'_{C_\phi}} + \frac{\Delta H_{\text{выост}}^{H_2} \cdot 1,06 \cdot (1-\alpha_n)}{Q'_{C_\phi}} + \frac{\Delta H_{\text{выост}}^{CO} \cdot 1,06 \cdot \alpha_n}{Q'_{C_\phi}} - \frac{J_C \cdot 1,06}{Q'_{C_\phi}} + 1,06$$

Подставляя найденное значение r_d в выражение (2.11) находим C_k^r , а затем и K .

Для проверки устойчивости показателей δ и $z_{отд}$ выполнен расчет расхода кокса на той же печи № 5 ОАО “Северсталь” в декабре 2000 г. Состав чугуна (%) : [C]=4.97, [Si]=0.58, [Mn]=0.23, [P]=0.039, [S]=0.014; состав кокса (%): зола кокса 11 %, летучие кокса 1 %, сера кокса 0.5 %; температура дутья 1205 °С; влажность дутья 8.8 г/м³; содержание O₂ в дутье 0.23 м³/м³ сух. дутья; расход природного газа 99 м³/т чугуна; температура чугуна 1499 °С; температура шлака 1549 °С.

Расчет относительного расхода кокса с учетом ЦКО (метод ПДК-2) показал, что $K_{расч} \approx K_{факт}$ ($K_{расч} = 432$ кг/т чуг.; $K_{факт} = 421$ кг/т чуг.). Расчет по методу ПДК дает значение $K_{min} = 362$ кг/т чуг., т.е. $K_{min} = 0.86 \cdot K_i$.

Учет наличия ЦКО формально снимает все возражения против исходных положений расчета по методу ПДК, т.к. “автоматически” невилирует ошибки в выборе температуры на границе зон (t_n), разницы температур шихты и газов на границе зон (Δt), величин K_p , ΔH_{T_1} и т.д., так как в результате расчета получают действительное (или весьма близкое к действительному) значение расхода кокса при прогнозах влияния на него различных факторов доменной плавки. Это и является главным достоинством метода ПДК, адаптированным к реальным условиям плавки (ПДК-2), который может претендовать в настоящее время на самый точный метод прогноза показателей плавки при изменении тех или иных параметров ее режима.

Глава 3. Разработка новых и усовершенствование существующих технологий доменной плавки, а также оценка их эффективности по методу ПДК2.

Производится прогнозный расчет основных показателей плавки по усовершенствованному методу ПДК (ПДК2) для различных технологий доменного процесса. В расчете использованы данные работы доменной печи № 5 ОАО “Северсталь” в 2000 г.

3.1. Оценка влияния различных факторов на относительный расход кокса

Расчет произведен по двум вариантам: I - при естественно меняющейся теоретической температуре горения углерода топлив (t_t) и II - при изменении расхода топливной добавки (у нас - природного газа) по условию поддержания t_t на исходном уровне. В первом варианте (I) реализация того или иного технологического решения (например, повышение температуры дутья) приводит к снижению относительного расхода кокса и, одновременно с этим, к изменению (в данном случае к повышению) теоретической температуры горения по сравнению с ее первоначальной величиной. В данном варианте теоретическая температура не поддерживается на исходном уровне (не снижается до начальной величины) (см. шаги 1-12 на рис. 3.1).

Второй вариант (II) заключается в том, что возросшая одновременно со снижением относительного расхода кокса теоретическая температура снижается до начальной величины путем вдувания дополнительного количества природного газа в горн доменной печи, что в свою очередь приводит к дополнительной экономии кокса (см. шаги 1-19 на рис. 3.1).

Результаты расчета сведены в таблицы 3.1-3.4.

Таблица 3.1

Влияние повышения температуры дутья на относительный расход кокса

Вариант	1-й вар-т: (при прочих равных условиях)		2-й вар-т: (при изменении расхода ПГ по условию постоянства теоретич. температуры горения $t_t = t_{исх} = 2051$ °C)	
	$t_{теор}$, °C	$K_{ожид}$, кг/т чуг.	$V_{ПГ}$, м ³ /т чуг.	$K_{ожид}$, кг/т чуг.
Температура дутья, град				
1205	2051	432,0	99	432,0
1230	2064	429,1	102,5	426,5
1255	2077	426,2	105,8	421,1
1280	2090	423,4	109,4	415,7

Таблица 3.2

Влияние повышения температуры природного газа на относительный расход кокса

Вариант	1-й вар-т: (при прочих равных условиях)		2-й вар-т: (при изменении расхода ПГ по условию постоянства теоретич. температуры горения $t_t = t_{исх} = 2051$ °C)	
	$t_{теор}$, °C	$K_{ожид}$, кг/т чуг.	$V_{ПГ}$, м ³ /т чуг.	$K_{ожид}$, кг/т чуг.
Температура природного газа, град				
0	2051	432,0	99	432,0
200	2061	429,8	101,7	427,8
300	2067	428,5	103,4	425,1
500	2081	425,4	107,6	418,4
600	2089	423,6	110,2	414,4

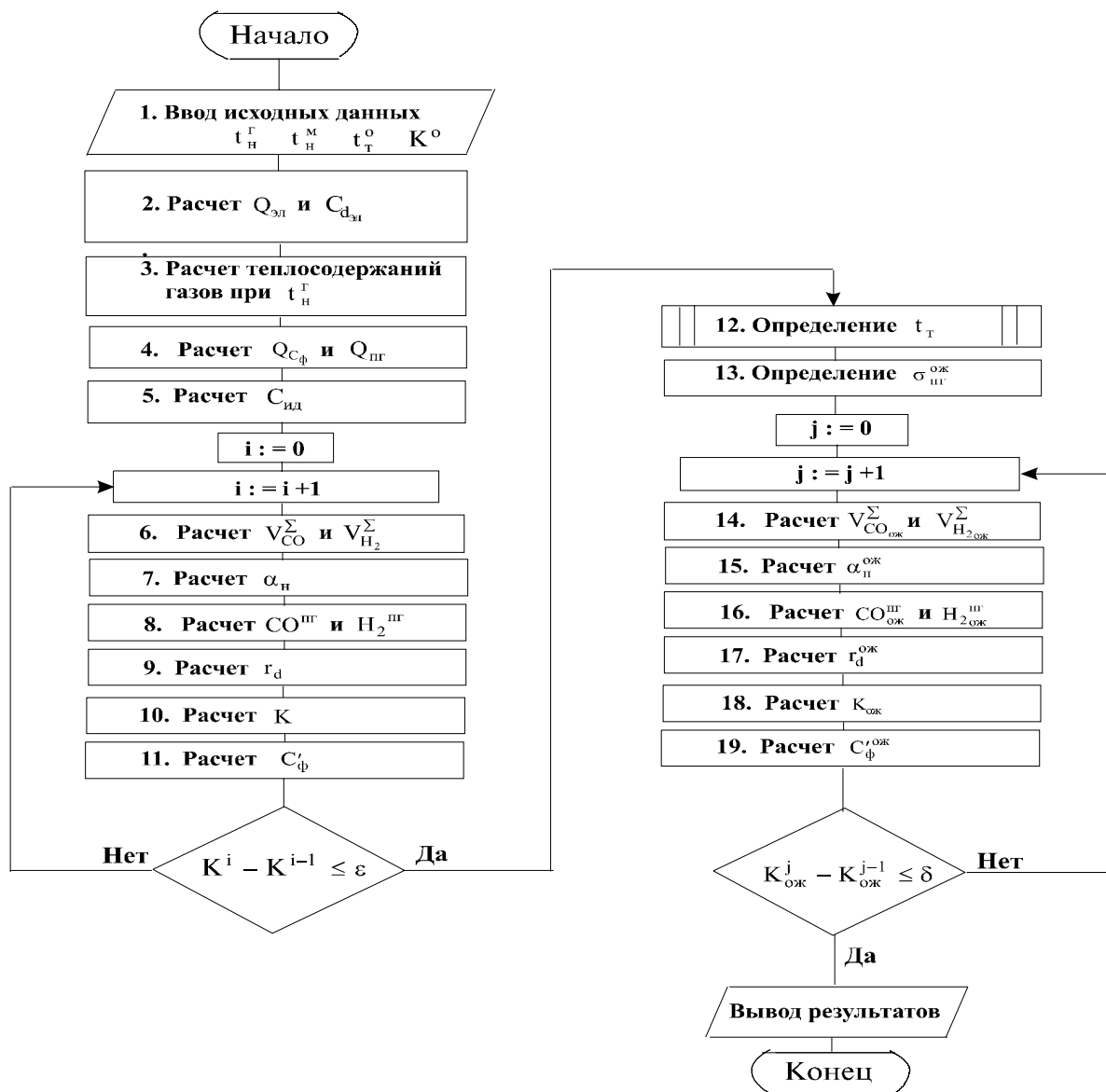


Рис. 3.1. Блок схема прогнозного расчета основных параметров доменной плавки (где ε - точность, $\varepsilon = 0,01$; δ - разность между K^{i-1} и K^i ; i - номер итерации).

Таблица 3.3

Влияние повышения содержания кислорода в дутье на относительный расход кокса

Вариант	1-й вар-т. (при прочих равных условиях)		2-й вар-т. (при изменении расхода ПГ по условию постоянства теоретич. температуры горения $t_r = t_{нех} = 2051$ °С)	
	$t_{теор}$, °С	$K_{ожид}$, кг/т чугу.	$V_{ПГ}$, м ³ /т чугу.	$K_{ожид}$, кг/т чугу.
Содержание кислорода в дутье, %				
23	2051	432,0	99	432,0
25	2109	434,7	114,1	423,6
27	2163	437,0	127,4	416,1
29	2216	439,1	139,2	409,5
31	2264	440,9	149,8	403,4

Влияние влажности дутья на относительный расход кокса

Вариант	1-й вар-т: (при прочих равных условиях)		2-й вар-т: (при изменении расхода ПГ по условию постоянства теоретич. температуры горения $t_T = t_{исх} = 2051 \text{ }^\circ\text{C}$)	
	$t_{теор}$, $^\circ\text{C}$	$K_{ожид}$, кг/т чугу.	$V_{ПГ}$, $\text{м}^3/\text{т}$ чугу.	$K_{ожид}$, кг/т чугу.
8,8	2051	432,0	99	432,0
10,8	2043	433,3	96,7	434,9
12,8	2034	434,6	94,4	437,9
14,8	2026	435,9	92,1	440,9
16,8	2018	437,2	89,8	444,0

Обращает на себя внимание высокая эффективность повышения температуры дутья, плавки с предварительно нагретым (до $500 \text{ }^\circ\text{C}^*$) природным газом и плавка на осушенном дутье по условию поддержания на исходном уровне теоретических температур горения за счет изменения расходов природного газа. Только ошибочные расчеты заниженной (примерно в два раза!) эффективности указанных мероприятий задерживают реконструкцию воздухонагревателей, строительство рекуператоров для нагрева природного газа и установок по осушению дутья (хотя бы в летний период) с использованием, например, криогенной технологии (вымораживание влаги дутья).

3.2. Вдувание в горн печи железосодержащих отходов.

Резко сократить вредные выбросы комбинатов позволит лишь ликвидация агломерационного производства. При сносе существующих аглофабрик необходимо решить проблему утилизации железосодержащих отходов текущего производства комбината (безотходное производство). Предложено решение указанной проблемы путем вдувания железосодержащих отходов в горн доменной печи.

Произведен расчет основных показателей доменной плавки по методу ПДК2 для следующих вариантов вдувания железосодержащих добавок в горн доменной печи:

- вдувание нагретых до $900 \text{ }^\circ\text{C}$ железосодержащих добавок при различных расходах природного газа;
- вдувание холодных железосодержащих добавок при различных расходах природного газа;

*) Увеличить нагрев природного газа на $\sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ (т.е. нагревать газ в рекуператорах до $600 \text{ }^\circ\text{C}$) и избежать при этом пиролиза можно путем пассивации его небольшими добавками технического кислорода.

В формулу, описывающую расход углерода кокса как источника тепла внесено дополнительное слагаемое $C^{доп}$:

$$C^{доп} = \sigma \left[\frac{1}{2} \beta^{Fe_2O_3} \frac{\Delta H^{Fe_2O_3}}{Q_{C\phi}} + \frac{1}{3} \beta^{Fe_3O_4} \frac{\Delta H^{Fe_3O_4}}{Q_{C\phi}} - 1,06 \frac{\Delta H_{вюст}}{Q_{C\phi}} + \frac{4}{3} \beta^{Fe_3O_4} + \frac{3}{2} \beta^{Fe_2O_3} - 1,06 \right], \quad (3.1)$$

где $\Delta H_{вюст}$ и $\Delta H^{окс}$ - тепловые эффекты реакций прямого восстановления вюстита, поступающего в горн доменной печи (ДП) из шахты (Дж/моль $Fe_{0,947}O_{ш}$), а также прямого восстановления соответствующего оксида (Fe_3O_4 или Fe_2O_3), вдуваемого в горн доменной печи (Дж/моль оксида);

$$\sigma = \frac{Fe_{\Gamma}}{Fe_{\Sigma}} - \text{доля суммарного железа, вдуваемого через горн } (Fe_{\Gamma}) \text{ во всем железе, поступающем в ДП}$$

(Fe_{Σ}), моль Fe_{Γ} / моль Fe_{Σ} ;

β_i - доля железа i -го оксида (Fe_3O_4 или Fe_2O_3)(Fe_i) в суммарном железе оксидов, моль Fe_i / моль $Fe_{окс}$.

В расчетах соблюдается условие $t_r = const$. Результаты расчета сведены в таблицу 3.5. (В скобках приведен расход кокса в базовом варианте, т.е. варианте без вдувания железосодержащих добавок; в числителе - холодные железосодержащие добавки; в знаменателе - железосодержащие добавки нагретые до 900 °С).

Таблица 3.5

Вдувание природного газа (ПГ) и железосодержащих добавок

Расход ПГ, м ³ /т чугуна	60		90		120	
	Расход железосодержащей добавки, $m_{доб}$ (кг/т чугуна)	80	40	80	40	80
Содержание O ₂ в дутье, ω (м ³ /м ³ сух. дутья)	<u>0,21</u> 0,21	<u>0,21</u> 0,21	<u>0,243</u> 0,241	<u>0,231</u> 0,229	<u>0,292</u> 0,289	<u>0,276</u> 0,274
Содержание влаги в дутье φ , (м ³ /м ³ сух. дутья)	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Степень прямого восстановления, Γ_d	<u>0,3826</u> 0,3852	<u>0,3876</u> 0,3889	<u>0,3337</u> 0,3362	<u>0,3386</u> 0,3400	<u>0,2847</u> 0,2873	<u>0,2896</u> 0,2910
Расход кокса, К (кг/т чугуна)	<u>467 (457)</u> 463	<u>462 (457)</u> 460	<u>448 (438)</u> 444	<u>443 (438)</u> 441	<u>429 (419)</u> 425	<u>424 (419)</u> 422

Из таблицы 3.5 видно, что утилизация железосодержащих отходов производства методом вдувания их в горн доменной печи сопровождается незначительным снижением экономии кокса (в зависимости от варианта реализации перерасходуется от 5 до 10 кг кокса на т. чугуна).

В металлошихте доменных печей предполагается использовать до 100 % окатышей. В связи с этим, на примере реконструкции схемы обогащения руд на одном из трех ГОКов, снабжающих окатышами и концентратами ЧерМК (ОАО “Северсталь”), с учетом

строительства фабрики для производства окатышей мощностью 9200 тыс. т. в год непосредственно на Оленегорском ГОКе рассчитаны показатели плавки по расходам сырья и кокса, а также по концентрации кислорода в дутье по условию $t_T = \text{const}$ при утилизации железосодержащих отходов текущего производства в количестве 40 кг/т чугуна путем вдувания их в горн печи.

А металлошихте использовать: костомукшские окатыши в количестве 600 кг/т чугуна, окатыши из смеси 2-х концентратов (65 % оленегорского и 35 % ковдорского) в количестве 880 кг/т чугуна, а также конвертерный шлак в количестве 45 кг/т чугуна. Результаты расчета приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Показатели плавки до (знаменатель) и после (числитель) реконструкции рудоподготовки.

Расход вдуваемой в горн печи железосодержащей добавки, $m_{\text{доб}}$, (кг/т чуг.)	40 / 0
Расход природного газа, $m^3/\text{т чуг.}$	99
Содержание O_2 в дутье, ω (m^3/m^3 сух. дутья)	0,245 / 0,23
Содержание влаги в дутье φ , (m^3/m^3 сух. дутья)	0,011 / 0,011
Расход кокса, K (кг/т чуг.)	433,67 / 432,02
Выход шлака, u (кг/т чугуна)	222 / 273
Расход металлошихты, $M_{\text{мш}}$ (кг/т чуг.)	1503 / 1620
Теоретическая температура горения, t_T ($^{\circ}C$)	2052 / 2051
Производительность, %	112 / 100

Из таблицы 3.6 видно, что согласно расчету, относительный расход кокса увеличился на 1,65 кг/т чуг., а выход шлака снизился на 51 кг/т чугуна.

3.3. Скрытые резервы технологии доменной плавки с вдуванием в горн пылеугольного топлива.

Важным параметром, ограничивающим увеличение расхода ПУТ является критический (т.е. минимально необходимый) расход кокса ($K_{\text{крит}}$) по условию нормальной фильтрации жидких продуктов плавки через коксовую насадку. Критический расход кокса определяется следующей формулой:

$$K_{\text{крит}} = \frac{\gamma_k}{\varepsilon_k \cdot a} \left(\frac{u}{\rho_u} + \frac{l}{\rho_e} \right) \quad (3.2)$$

где γ_k - насыпная масса кокса, т / м³;
 ρ_u и ρ_e - плотности шлака и чугуна, т / м³;
 u - выход шлака, т / т чугуна;
 ε_k - порозность слоя кокса, м³/м³;
 a - допустимый коэффициент заполнения свободного объема коксовой насадки жидкими продуктами плавки, ($a < 1$).

Из формулы (3.2) следует, что $K_{\text{крит}}$ прямо пропорционально количеству жидких продуктов плавки, фильтрующихся через коксовую насадку, которое в свою очередь определяется выходом шлака на единицу чугуна. Замена 5-10 % части дорогостоящей металлошихты, загружаемой через колошник, вдуваемыми в горн отходами металлургического производства, приведет к снижению количества жидких продуктов плавки, фильтрующихся через коксовую насадку, на 5-10 %, а значит и $K_{\text{крит}}$ уменьшится, соответственно, на 11,5 и 23 кг/т чугуна. Как показали расчеты по методу ПДК2 для снижения относительного расхода кокса на заданную величину (11,5 или 23 кг / т чугуна) при вдувании добавок, необходимо, расход ПУТ увеличить, соответственно, на 28 и 56 кг / т чугуна.

3.4. Эффективность равномерного распределения расходов дутья и природного газа по фурмам.

На доменных печах, работающих с вдуванием в горн дополнительных топлив, до сих пор скрытым резервом по дальнейшему сокращению расхода кокса и себестоимости чугуна остается повышение расхода топливной добавки при снижении теоретической температуры горения углерода на фурмах (t_T) до ее действительно минимально допустимой величины (t_T^{min}), т.е. рассчитанной не в среднем по печи, а для фурм с максимальным отношением расхода топливной добавки к расходу дутья, действительно контролирующим нормальный режим работы горна печи. По данным Дж. Моу (рис. 3.2), усредненные отклонения значений минимальных расходов дутья (V_d^{min}) от среднего по печи (V_d^{cp}) составили около 20 % . По данным других исследователей эти отклонения составляют 25-40 % от среднего по печи.

После пуска в эксплуатацию АСУ равномерным распределением дутья и природного газа по фурмам при сохранении всех прочих условий плавки появится возможность

повышения расхода природного газа на доменных печах ОАО “Северсталь” минимум на 30 м³/т чугуна.

Результаты расчета показали, что при увеличении расхода природного газа на 30 м³/т чугуна (с 120 до 150 м³/т чугуна) экономия кокса при перераспределении природного газа по фурмам составила 22 кг/т чугуна.

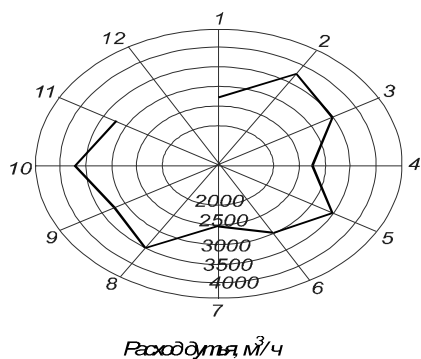


Рис. 3.2. Распределение дутья по фурмам доменной печи №4 завода “ Карри Фернейсис” по результатам исследований Дж. Моу (цифры по окружности печи - номера фурм).

3.5. Влияние реакционной способности кокса на его расход в доменной печи

Произведена оценка эффективности снижения температуры отходящих из нижней зоны теплообмена горновых газов (t_n^r). Указанная температура ($t_n^r = 900$ °С) принимается равной температуре начала взаимодействия диоксида углерода CO_2 с углеродом кокса C_K (реакция регенерации монооксида углерода). Температура начала и интенсивность взаимодействия CO_2 с C_K зависит от пористой структуры кокса и наличия катализаторов (K_2O , Na_2O , CaO), которые увеличивают реакционную способность кокса. С увеличением реакционной способности температура начала взаимодействия CO_2 с C_K (или t_n^r) снижается. Согласно расчету, при уменьшении указанной температуры с 900 °С до 800 и 700 °С относительный расход кокса снизился соответственно на 17 и 34 кг/т чугуна.

Глава 4. Контроль условий теплообмена между газом и шихтой по высоте печи

В главе произведена проверка обеспеченности теплом верхней ступени теплообмена и завершенности теплообмена в нижней зоне по отношениям “водяных” чисел шихты и газа для указанных выше технологических режимов плавки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В ходе выполнения работы был решен ряд следующих теоретических и практических вопросов.

1. Усовершенствован (адаптирован к реальным условиям работы печей) метод ПДК (ПДК2) для расчета основных показателей доменной плавки. Прямым доказательством пригодности метода ПДК2 для прогнозных расчетов явилось практически полное совпадение данных полученных по указанному методу с данными практики.

2. Произведен прогнозный расчет основных показателей доменной плавки при внедрении усовершенствованной технологии плавки с равномерным распределением расходов дутья и природного газа с целью поддержания постоянной минимальной теоретической температуры горения топлив на каждой из воздушных фурм.

3. Произведен прогнозный расчет основных показателей доменной плавки при внедрении новой технологии, предполагающей закрытие аглофабрики. Суть новой технологии заключается во вдувании отходов металлургического производства (например, колошниковой пыли, отсева мелочи, окалины и т.п.), утилизирующихся до сих пор на аглофабрике при производстве агломерата, в горн доменной печи.

4. Предложена новая уникальная технология по снижению расхода кокса, суть которой состоит в повышении реакционной способности кокса, без ухудшения его прочностных свойств. В результате этого происходит уменьшение температуры начала реакции прямого восстановления вюстита, что в свою очередь приводит к снижению температуры газов, покидающих нижнюю зону, и как результат этого, к снижению удельного расхода кокса.

5. Внесено предложение в качестве средства для устранения режима затопления коксовой насадки жидкими продуктами плавки при снижении расхода кокса ниже его критической величины (по условию нормальной фильтрации жидких продуктов плавки через коксовую насадку) использовать вдувание железосодержащих отходов или концентратов руд непосредственно в горн доменной печи.

6. На основе метода ПДК2 разработана усовершенствованная методика прогнозного расчета расхода кокса в зависимости от различных факторов плавки по условию стабилизации теоретической температуры горения углерода топлив на исходном уровне путем изменения расхода вдуваемого природного газа. Данная методика расчета может найти свое применение и для вариантов плавки с вдуванием в горн печи пылеугольного топлива или мазута.

Основные положения диссертации отражены в следующих работах:

1. Белов Ю.А, Андронов В.Н. “Дефицит восстановителя как теоретическая основа новых технологий доменного производства”. // XXVIII неделя науки СПбГТУ / Материалы межвузовской научной конференции - СПб: Изд-во СПбГТУ, 1999 г., с. 92-93.
2. Андронов В.Н, Белов Ю.А. “О влиянии реакционной способности кокса на его расход в доменной печи”. // V Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы / Фундаментальные исследования в технических университетах - СПб: Изд-во СПбГТУ, 2001 г., с. 139-140.
3. Белов Ю.А., Лычев А.В. “Скрытые резервы технологии доменной плавки с вдуванием в горн пылеугольного топлива”. // VI Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы / Фундаментальные исследования в технических университетах - СПб: Изд-во СПбГТУ, 2002 г., с. 145-147.
4. Лычев А.В., Белов Ю.А. “Совершенствование системы контроля теплового режима плавки по изменению прямого восстановления”. // VI Всероссийская конференция по проблемам науки и высшей школы / Фундаментальные исследования в технических университетах - СПб: Изд-во СПбГТУ, 2002 г., с. 165-166.
5. Белов Ю.А., Андронов В.Н., Лычев А.В. “Расчет показателей доменной плавки по усовершенствованному методу ПДК” // VII Международный конгресс специалистов доменного производства, Москва - Череповец, сентябрь 2002 г.
6. Лычев А.В., Андронов В.Н., Белов Ю.А. “Методика расчета степени прямого восстановления железа” // VII Международный конгресс специалистов доменного производства, Москва - Череповец, сентябрь 2002 г.
7. Андронов В.Н, Белов Ю.А. “Оценка эффективности равномерного распределения расходов дутья и природного газа по фурмам”. // “Сталь”, № 9, 2002 г, с. 12-15.
8. Андронов В.Н., Белов Ю.А., Лычев А.В. “Оценка расхода кокса методом ПДК с учетом центральной коксовой отдушины в столбе шихты”. // “Сталь”, № 8, 2003 г, с. 10-15.
9. Белов Ю.А. “Ликвидация аглофабрик как эффективный способ кардинального улучшения экологической обстановки на металлургических комбинатах”. // “Черные металлы”, № 9, 2003 г., с. 12-16.
10. Белов Ю.А. “Расчет относительного расхода кокса при вдувании в горн доменных печей железосодержащих добавок”. // “Известия высших учебных заведений. Черная металлургия”, № 9, 2003 г., с.13-15.