

Министерство науки
и высшего образования
Российской Федерации



Л. Ю. Гилёва, С.А. Загайнов

ТЕХНОЛОГИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ. РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Электронный образовательный текстовый ресурс

Учебно-методические материалы по дисциплинам «Теория и технология доменной плавки», «Методы анализа и прогноза технологических режимов доменной плавки» для студентов всех форм обучения направления подготовки «Металлургия» (22.03.02, 22.04.02)

Обобщены и систематизированы методики расчета технологического режима и показателей работы доменных печей, приведены необходимые для расчетов справочные данные и данные о работе ряда доменных печей.

Подготовлено кафедрой «Металлургия железа и сплавов»

Екатеринбург

2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Общие положения.....	4
2 Информационное обеспечение технологических расчетов.....	10
2.1 Технологические данные о работе доменных печей.....	10
2.2 Нормативно-справочная информация.....	11
2.3 Показатели, характеризующие технологический режим доменной плавки.....	16
3 Расчет основных показателей доменной плавки.....	19
4 Расчет показателей дутьевого режима.....	22
4.1 Удельный расход дутья.....	22
4.2 Выход и состав фурменных газов.....	23
4.3 Теоретическая температура горения.....	23
4.4 Размеры фурменного очага.....	24
5 Расчет показателей газодинамического режима.....	28
5.1 Газодинамические характеристики шихтовых материалов.....	29
5.2 Анализ условий движения газов.....	31
5.2.1 Верхняя зона печи.....	31
5.2.2 Нижняя зона печи.....	32
6 Расчет показателей шлакового режима.....	35
6.1 Первичный шлак.....	35
6.2 Промежуточный шлак.....	37
6.3 Конечный шлак.....	37
7 Расчет показателей теплового состояния печи.....	42
7.1 Понятие теплового состояния доменной печи.....	42
7.2 Тепловое состояние верха печи.....	43
7.3 Тепловое состояние низа печи.....	45
8 Расчет показателей, характеризующих развитие процессов восстановления оксидов железа.....	47
Приложение А.....	51
Библиографический список.....	52

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая часть учебно-методических материалов содержит обобщенные и систематизированные методики расчета технологического режима и показателей работы доменных печей, описание информационного обеспечения технологических расчетов, используемые в расчетах справочные данные.

Данный ресурс используется при выполнении учебных мероприятий ряда дисциплин учебных планов по направлению «Металлургия» (22.03.02, 22.04.02), реализуемых на кафедре «Металлургия железа и сплавов», а также при выполнении курсового проектирования и научно-исследовательской работы студентов всех форм обучения.

Приведенные материалы носят описательный характер, закономерности развития физико-химических процессов и установленные эмпирическим путем зависимости записаны в общем виде. Для решения конкретных задач оценки и прогноза технологического режима приведенные уравнения могут быть преобразованы с учетом указанных в заданиях условий и ограничений. Задания, а также конкретные методики проведения практических, лабораторных занятий, выполнения домашних заданий и курсовых работ приведены в соответствующих учебно-методических указаниях по дисциплине.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Технология доменной плавки устанавливает такие значения режимных параметров (состава шихтовых материалов, программы их загрузки, параметров комбинированного дутья и режима отработки продуктов плавки), при которых достигается заданное качество чугуна при заданной производительности доменной печи и минимальных затратах топлива при существующих сырьевых и топливно-энергетических условиях.

Установленный технологический регламент должен обеспечивать оптимальное развитие физико-химических процессов. Основными физико-химическими процессами доменной плавки являются:

- формирование столба шихтовых материалов;
- восстановление оксидов железа;
- образование шлака и чугуна;
- теплообмен между встречными потоками шихты и газа;
- движение шихтовых материалов и газов;
- горение топлива на фурмах;
- восстановление примесных элементов.

Кроме того, технология ведения доменной плавки предусматривает мероприятия, направленные на обеспечение нормального режима плавки при отклонениях хода процесса от заданного в результате действия неконтролируемых возмущений.

К основным возмущениям можно отнести:

- изменение восстановимости железорудных материалов;
- изменение гранулометрического состава агломерата;
- изменение химического состава компонентов железорудной части шихты;
- изменение горячей прочности кокса;
- изменение гранулометрического состава кокса;
- изменение распределения рудной нагрузки по радиусу печи.

К особым видам возмущения следует отнести ошибки технологического персонала при перешихтовках.

Таким образом, задача управления доменным процессом связана с выбором технологических решений, направленных на реализацию нормального технологического режима и компенсацию действия контролируемых и неконтролируемых возмущений.

Выбор технологического режима или решение задач оперативного управления реализуется в рамках подходов, основанных на математическом моделировании доменного процесса. Современные представления об основных процессах доменной плавки и методы математического моделирования физико-химических явлений, отражены в многочисленных монографиях и статьях [1-13].

Анализ доменного процесса как объекта моделирования показывает, что при решении задач анализа и прогноза показателей доменной плавки требуется декомпозиция исходной системы на следующие основные подсистемы: механические процессы – движение шихты и газа, гидродинамические процессы – движение расплавов, тепловые процессы – теплообмен между потоками шихт и газов, химические процессы – горение твердого топлива, процессы восстановления оксидов.

В общем случае, все эти процессы достаточно сложны, и могут быть представлены совокупностью более детальных подсистем. Так, например, теплообмен можно рассматривать для каждой из фаз и компонентов шихты: газовой фазы, топлива, рудной составляющей шихты, металлического, шлакового расплавов. При более глубоком исследовании процессов приходится учитывать особенности режимов протекания основных процессов. При изучении механических процессов необходимо учитывать существенные различия в движении шихтовых материалов, газов, расплавов.

Анализ функциональных связей выделенных подсистем показывает, что все они взаимосвязаны и через общие параметры определяют работу друг друга. Кроме того, ход процессов в значительной степени зависит от внешних условий – режимных параметров работы доменной печи и ее конструкции.

Выбор структуры системы, степень детализации ее элементов и подсистем определяется целями исследования и содержит возможность варьирования, так как структура отражает не реальную систему, а лишь некоторые ее свойства, важные с точки зрения достижения поставленной цели.

При решении задач управления технологией доменной плавки структуризация доменного процесса, приведенная на рисунке 1.1, позволяет определить основные подсистемы технологического режима, взаимосвязи между ними и показателями плавки – удельным расходом кокса и производительностью печи.

Дутьевой режим доменной плавки охватывает процессы, протекающие в фурменной зоне печи – процессы газификации твердого и инжестируемого топлива, определяется параметрами комбинированного дутья, количеством и конструкцией фурм. Дутьевой режим характеризуется геометрическими размерами и теоретической температурой фурменного очага. Влияние дутьевого режима на процессы доменной плавки определяется интенсивностью горения твердого топлива, количеством, составом и температурой восстановительного газа, а также положением и размерами фурменной зоны.

Газодинамический режим доменной плавки охватывает процессы взаимного движения шихты и газа – процессы формирования структуры столба шихтовых материалов, процессы распределения газового потока по радиусу печи, процессы движения газа в слое. В целом газодинамический режим определяется качеством шихтовых материалов, характеристиками газового потока, а также температурными условиями, формирующимися в объеме печи за счет теплообменных процессов.

Газодинамический режим характеризуется удельным газодинамическим сопротивлением шихты, общим и частными перепадами давления по высоте печи, степенью уравнивания шихты потоком газа, критическими значениями перепада давления по высоте печи и расхода дутья и определяет условия протекания процессов восстановления оксидов железа и резервы печи по повышению ее производительности.

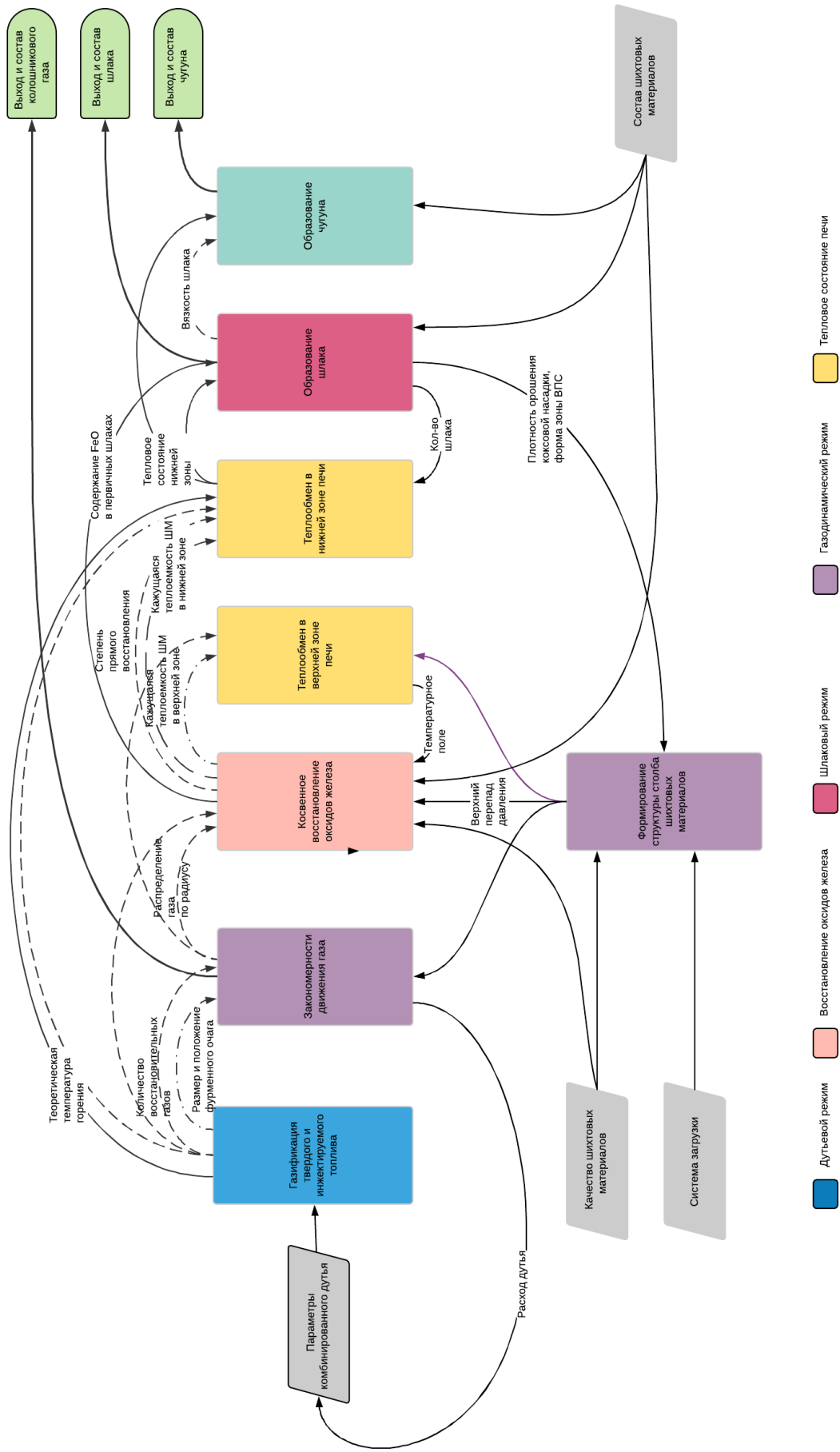


Рис. 1.1. Структурная схема доменного процесса

Тепловой режим доменной плавки охватывает процессы теплообмена между потоками газа и шихты в верхней и нижней зонах печи, определяется теплофизическими характеристиками потоков газа и шихты и тепловыми эффектами протекающих в объеме печи физико-химических процессов. В результате теплообменных процессов формируется температурное поле печи, которое в свою очередь определяет полноту и место протекания процессов восстановления оксидов железа и примесных элементов, и шлакообразования. Тепловой режим доменной плавки принято характеризовать комплексными показателями, учитывающими степень развития теплообменных процессов в верхней зоне печи и теплопотребность процесса в нижней зоне печи.

Шлаковый режим доменной плавки охватывает процессы расплавления пустой породы железорудных материалов и образования первичного и конечного шлаков. Шлаковый режим определяется составом шихтовых материалов, интенсивностью восстановления оксидов железа и примесных элементов. Шлаковый режим характеризуется температурным интервалом шлакообразования, политермой вязкости шлака, десульфуризирующей способностью шлака. Шлаковый режим оказывает влияние на газопроницаемость столба шихтовых материалов, на процессы восстановления оксидов примесных элементов.

Перечисленные выше режимы в той или иной мере определяют восстановительные процессы доменной плавки – процессы косвенного и прямого восстановления оксидов железа и примесных элементов.

Процессы косвенного восстановления протекают в шахте печи и оказывают влияние на температурное поле верхней ступени теплообмена. Наличие обратных связей (температурное поле – степень восстановления оксидов железа – температурное поле) является частной иллюстрацией взаимообусловленности градиентных процессов тепло-массообмена в открытых системах.

Полнота протекания восстановительных процессов в шахте печи характеризуется индексом косвенного восстановления и определяет количество

железа, восстанавливающего в нижней зоне печи прямым путем, тем самым определяя удельные затраты тепла на образование чугуна и тепловые условия восстановления примесей чугуна.

В настоящей части учебно-методических материалов определены основные подходы к математическому описанию подсистем технологического режима доменной плавки, обобщены и структурированы методики расчета показателей технологического режима с использованием технологической информации о работе доменных печей.

Отдельным разделом в учебно-методических материалах представлено информационное обеспечение технологических расчетов, включающее в себя описание технологической информации о работе печи, показателей технологического режима и показателей доменной плавки, необходимые справочные данные.

Учитывая, что все подсистемы и показатели работы доменной печи взаимосвязаны и взаимообусловлены, при математическом описании отдельных подсистем могут быть использованы переменные, определяемые в последующих разделах учебно-методических материалов.

2 ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

В математическом описании режимов доменной плавки используется следующие виды информации:

- 1.1. Технологические данные о работе доменных печей.
- 1.3. Нормативно-справочная информация.
- 1.4. Показатели, характеризующие технологический режим доменной плавки.

2.1 Технологические данные о работе доменных печей

В таблице 2.1 приведены обозначение, наименование, единица измерения контролируемых параметров и показателей доменного процесса, используемых в расчетных методиках.

Таблица 2.1

Перечень технологических данных

Наименование	Обозначение	Ед. изм.
Расход дутья	V_D	$\text{м}^3/\text{мин}$
Давление дутья	P_D	ати
Температура дутья	t_D	$^{\circ}\text{C}$
Влажность дутья	H_2O^D	$\text{г}/\text{м}^3$
Содержание кислорода в дутье	O_2^D	%
Расход природного газа	$V_{\text{ПГ}}$	$\text{м}^3/\text{мин}$
Расход пылеугольного топлива	$G_{\text{ПУТ}}$	кг/мин
Суточный расход кокса	R_K	т/сутки
Суточный расход железорудных материалов	$R_{\text{ЖРМ}}$	т/сутки
Содержание железа в железорудных материалах	$\text{Fe}_{\text{ЖРМ}}$	%
Содержание FeO в железорудных материалах	$\text{FeO}_{\text{ЖРМ}}$	%
Суточное производство	$P_{\text{сут}}$	т/сутки
Содержание элементов в чугуна	[Fe], [C], [Si], [Mn]	%
Температура чугуна	$t_{\text{ч}}$	$^{\circ}\text{C}$
Содержание оксидов в шлаке	$(\text{CaO}), (\text{SiO}_2),$ $(\text{Al}_2\text{O}_3), (\text{MgO})$	%
Состав колошникового газа	$\text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2$	%

Продолжение таблицы 2.1

Наименование	Обозначение	Ед. изм.
Температура колошникового газа	$t_{\text{КГ}}$	°С
Давление под колошником	$P_{\text{КГ}}$	ати
Общий, верхний и нижний перепады давления	$\Delta P; \Delta P_{\text{В}}; \Delta P_{\text{Н}}$	ат
Фракционный состав агломерата: доля фракции агломерата более 40, 25–40, 10–25; 5–10 менее 5 мм, соответственно	$\alpha_{+40}; \alpha_{25-40}; \alpha_{10-25}; \alpha_{10-5}; \alpha_{-5}$	доли единицы
Фракционный состав кокса: доля фракции кокса более 80, 60–80, 40–60; 25–40, менее 25 мм, соответственно	$\alpha_{+80}; \alpha_{60-80}; \alpha_{40-60}; \alpha_{10-5}; \alpha_{-5}$	доли единицы
Средний диаметр окатышей	$d_{\text{ср}}^{\text{ок}}$	мм
Доля мелкой фракции (-5 мм) в окатышах	$\alpha_{-5}^{\text{ок}}$	доли единицы
Полезный объем печи	V_0	м ³
Полезная высота печи	H_0	м
Количество работающих фурм	$n_{\text{ф}}$	шт
Диаметр фурм	$D_{\text{ф}}$	мм
Диаметр горна	$D_{\text{г}}$	м
Диаметр распара	$D_{\text{р}}$	м

Значения параметров и показателей процесса для условий работы ряда доменных печей даны в таблице технологических данных (прил. А).

2.2 Нормативно-справочная информация

Обозначение, наименование и единица измерения справочных данных, используемых при математическом описании технологических режимов, приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Перечень нормативно-справочной информации

Наименование	Обозначение	Ед. изм.
Средняя объемная теплоемкость дутья	$c_{\text{Д}}$	кДж/м ³ ·К
Содержание водорода в природном газе	$(H_2)_{\text{ПГ}}$	м ³ /м ³
Содержание углерода в природном газе	$(C)_{\text{ПГ}}$	м ³ /м ³

Продолжение таблицы 2.2

Наименование	Обозначение	Ед. изм.
Доля природного газа, сгораемого в полости фурмы	$\alpha_{\text{ПГ}}$	доли единицы
Низшая теплота сгорания природного газа	$Q_{\text{нПГ}}^{\text{р}}$	кДж/м ³
Содержание золы в пылеугольном топливе	$A_{\text{ПУТ}}$	%
Содержание водорода в пылеугольном топливе	$(H_2)_{\text{ПУТ}}$	м ³ /кг
Содержание углерода в пылеугольном топливе	$(C)_{\text{ПУТ}}$	м ³ /кг
Доля пылеугольного топлива, сгораемого в полости фурмы	$\alpha_{\text{ПУТ}}$	доли единицы
Средняя удельная теплоемкость пылеугольного топлива	$c_{\text{ПУТ}}$	кДж/кг·К
Средняя удельная теплоемкость золы пылеугольного топлива	$c_{A_{\text{ПУТ}}}$	кДж/кг·К
Низшая теплота сгорания пылеугольного топлива	$Q_{\text{нПУТ}}^{\text{р}}$	кДж/м ³
Содержание золы, серы, летучих в коксе	$A_{\text{К}}, S_{\text{К}}, L_{\text{К}}$	%
Средняя удельная теплоемкость кокса	$c_{\text{К}}$	кДж/кг·К
Плотность газа, истекающего из фурмы, при нормальных условиях	$\rho_{\text{ГФ}}$	кг/м ³
Средняя объемная теплоемкость газа, истекающего из фурмы	$c_{\text{ГФ}}$	кДж/м ³ ·К
Средняя объемная теплоемкость фурменного газа	$c_{\text{Г}}$	кДж/м ³ ·К
Средний диаметр окатышей	$d_{\text{ср}}^{\text{ок}}$	мм
Доля мелочи в окатышах	$\alpha_{-5}^{\text{ок}}$	доли единицы
Теплоемкость чугуна	$c_{\text{ч}}$	кДж/т·К
Теплоемкость шлака	$c_{\text{шл}}$	кДж/т·К
Температура шлака	$t_{\text{шл}}$	°С
Тепловой эффект восстановления примеси чугуна [X]	$q_{[X]}$	кДж/т
Коэффициент уминки шихты	f	доли единицы
Средний для верхней зоны печи объемный коэффициент теплообмена между потоками шихты и газа	α_{V}	Вт/м ³ ·К
Температура раздела верхней и нижней зоны доменной печи	t_0	°С

К нормативно-справочной информации относятся как известные справочные данные о физико-химических, теплофизических характеристиках материалов и процессов, так и значения некоторых параметров доменной плавки.

1. Средняя объемная теплоемкость газовой смеси определяется составом газовой смеси и теплоемкостью газов при заданной температуре.

1.1. Зависимости теплоемкости газов от температуры:

$$\begin{aligned}c_{O_2}^t &= 1,303 + 0,00018t, \\c_{N_2}^t &= 1,289 + 0,00010t, \\c_{H_2}^t &= 1,275 + 0,00004t, \\c_{CO}^t &= 1,287 + 0,00012t, \\c_{CO_2}^t &= 1,645 + 0,00063t, \\c_{H_2O}^t &= 1,481 + 0,00023t.\end{aligned}$$

1.2. Средняя объемная теплоемкость горячего влажного дутья

$$\begin{aligned}c_D &= (1,303 + 0,00018t_D) \frac{O_2^D}{100} + (1,289 + 0,00010t_D) \frac{(100 - O_2^D)}{100} + \\&+ (1,481 + 0,00023t_D) \frac{H_2O^D}{1000} \frac{22,4}{18} \approx 1,38.\end{aligned}$$

1.3. Средняя объемная теплоемкость газа, истекающего из фурмы

$$\begin{aligned}c_{ГФ} &= (1,303 + 0,00018t_{ГФ}) \frac{O_2^{ГФ}}{100} + (1,289 + 0,00010t_{ГФ}) \frac{(100 - O_2^{ГФ} - CO^{ГФ})}{100} + \\&+ (1,287 + 0,00012t_{ГФ}) \frac{CO^{ГФ}}{100} + (1,481 + 0,00023t_{ГФ}) \frac{H_2O^{ГФ}}{1000} \frac{22,4}{18} \approx 1,5.\end{aligned}$$

1.4. Средняя объемная теплоемкость фурменного газа

$$\begin{aligned}c_{Г} &= (1,287 + 0,00012t_{Г}) \frac{CO^{Г}}{100} + (1,275 + 0,00004t_{Г}) \frac{H_2^{Г}}{100} \\&+ (1,289 + 0,00010t_{Г}) \frac{N_2^{Г}}{100} \approx 1,49.\end{aligned}$$

2. Плотность газа при нормальных условиях определяется составом газа.

2.1. Плотность газа, истекающего из фурмы

$$\rho_{ГФ} = \left(\frac{0,01}{22,4} (32O_2^{ГФ} + 28CO^{ГФ} + 2H_2^{ГФ} + 28N_2^{ГФ}) + \frac{H_2O^{ГФ}}{1000} \right) \approx 1,33$$

2.1. Плотность фурменного газа

$$\rho_{Г} = \left(\frac{0,01}{22,4} (28CO^{Г} + 2H_2^{Г} + 28N_2^{Г}) + \frac{H_2O^{Г}}{1000} \right) \approx 1,26$$

3. Состав и теплофизические характеристики природного газа:

- содержание углерода

$$(C)_{\text{ПГ}} = \sum_{n=1}^k n C_n H_m \approx 1,04;$$

- содержание водорода

$$(C)_{\text{ПГ}} = \sum_{n=1}^k m C_n H_m \approx 2,04;$$

- доля, сгораемая в полости фурмы 0,3 – 0,5;
- низшая теплота сгорания 35590 кДж/м³.

4. Состав и теплофизические характеристики пылеугольного топлива:

- содержание золы 8–17 %;
- содержание летучих 10–23 %;
- содержание углерода 1,4–1,5 м³/кг;
- содержание водорода 0,30–0,45 м³/кг;
- средняя удельная теплоемкость золы 1,2 кДж/кг·К;
- средняя удельная теплоемкость 1,5 кДж/кг·К;
- доля, сгораемая в полости фурмы 0,3–0,5;
- низшая теплота сгорания 32000–37000 кДж/кг;

5. Состав и теплофизические характеристики кокса:

- содержание золы 9–12 %;
- содержание летучих 0,6–0,8 %;
- содержание углерода 86–88 %;
- средняя удельная теплоемкость при температуре 1500 °С 1,4 кДж/кг·К.

6. Теплофизические характеристики доменного шлака:

- плотность 2,5–2,8 т/м³;
- теплоемкость 1,256 кДж/т·К;

7. Теплофизические характеристики чугуна:

- плотность 7,1–7,4 т/м³;
- теплоемкость 0,93 кДж/т·К;

8. Гранулометрический состав окатышей:

- средний диаметр окатышей 14–17 мм;
- содержание фракции <5 мм в окатышах 3–5 %.

9. Гранулометрический состав агломерата

Размер фракции, мм	Содержание фракции, %
>50	0
25-40	27,7
25-10	32,5
5-10	26,6
<5	13,6

10. Гранулометрический состав кокса

Размер фракции, мм	Содержание фракции, %
>80	18,2
80-60	41,9
60-40	33,4
40-25	3,8
<25	2,8

11. Термохимические данные

11.1. Тепловой эффект восстановления железа и примесей чугуна, кДж/кг

Элемент	Тепловой эффект, кДж/кг элемента
Fe	3 175
Mn	5 225
Si	22 650
P	26 300
V	12 600
Ti	14 500

11.2. Тепловой эффект реакции десульфурации – минус 5980 кДж/кг S.

11.3. Тепловой эффект реакции неполного горения углерода по реакции



- 11.4. Тепловой эффект реакции разложения паров воды углеродом – минус 5540 кДж/м³ паров воды.
- 11.5. Тепловой эффект реакции конверсии природного газа при содержании метана 99 % – минус 6912 кДж/м³ природного газа.
12. Температура газа на границе раздела верхней и нижней зоны доменной печи определяется температурой заметного развития реакции газификации углерода кокса и может быть принята равной 900 °С.
13. Средний для верхней зоны печи объемный коэффициент теплообмена между потоками шихты и газа 55,28 Вт/м³·К

2.3 Показатели, характеризующие технологический режим доменной плавки

В таблицах 2.3 – 2.8 приводится обозначение, наименование, единица измерения рассчитываемых показателей дутьевого, газодинамического, шлакового режимов доменной плавки, показателей теплового состояния печи и хода восстановительных процессов, соответственно.

Таблица 2.3

Показатели работы печи

Обозначение	Наименование	Ед. изм.
$P_{уд}^V$	Удельная производительность печи на единицу полезного объема печи	т/(м ³ сут)
$P_{уд}^S$	Удельная производительность печи на единицу площади горна	т/(м ² горна·сут)
P	Производительность печи	т/мин
$K_{уд}$	Удельный расход кокса	кг/т
$V_{ПГ}^{уд}$	Удельный расход природного газа	м ³ /т
$G_{ПУТ}^{уд}$	Удельный расход пылеугольного топлива	кг/т
$Ш$	Удельный выход шлака	кг/т
$V_{КГ}$	Выход колошникового газа	м ³ /мин

Таблица 2.4

Показатели дутьевого режима

Обозначение	Наименование	Ед. изм.
C_{Φ}^K	Количество углерода кокса, пришедшее к фурмам	м ³ /т
g_K	Количество газифицированного углерода кокса	м ³ /т
V_D^P	Удельный расход дутья	м ³ /т
f_D	Доля паров воды в дутье	м ³ /м ³
ω_D	Доля кислорода в дутье	м ³ /м ³
V_{Γ}^P	Удельный выход фурменного газа	м ³ /т
$N_2^{\Gamma}, CO^{\Gamma}, H_2^{\Gamma}$	Состав фурменного газа	%
Q_{Γ}	Теплосодержание фурменного газа	кДж/т
t_{Γ}	Температура фурменного газа	°С
L_{OK}	Протяженность окислительной зоны	мм
$L_{\text{ц}}$	Протяженность зоны циркуляции	мм
S_{OK}	Относительная площадь окислительных зон	%

Таблица 2.5

Показатели газодинамического режима

Обозначение	Наименование	Ед. изм.
$\epsilon_a, \epsilon_{OK}, \epsilon_K, \epsilon_{\text{ш}}$	Эквивалентный диаметр агломерата, окатышей, кокса и шихты, соответственно	м ³ /м ³
ϵ_{KH}	Порозность коксовой насадки	м ³ /м ³
$d_a, d_{OK}, d_K, d_{\text{ш}}$	Порозность слоя агломерата, окатышей, кокса и шихты, соответственно	мм
$\gamma_a, \gamma_{OK}, \gamma_K, \gamma_{\text{ш}}$	Насыпная масса (удельная плотность) слоя агломерата, окатышей, кокса и шихты, соответственно	т/м ³
CU	Степень уравнивания шихты газовым потоком	%

Таблица 2.6

Показатели хода восстановительных процессов

Обозначение	Наименование	Ед. изм.
η_{CO}	Степень использования монооксида углерода	доля единицы
η_{H_2}	Степень использования водорода	доля единицы
R_i	Индекс косвенного восстановления	доля единицы
r_d	Степень прямого восстановления	доля единицы

Таблица 2.7

Показатели шлакового режима

Обозначение	Наименование	Ед. изм.
$(FeO)^П$	Содержание монооксида железа в первичном шлаке	%
$t_{н.пл}$	Температура начала плавления железорудных материалов	°С
$t_{обр.ш}$	Температура образования первичного шлака	°С
$\Delta t_{ВПС}$	Температурный интервал зоны вязко-пластичного состояния	°С
η_t	Вязкость шлака при температуре t	Пуаз
$grad \eta$	Градиент вязкости шлака	н/м ² ·с/°С
L_S	Коэффициент распределения серы между шлаком и чугуном	доли единицы
$\rho_{орош}$	Плотность орошения коксовой насадки	м/мин
$v_{филт}$	Скорость фильтрации шлака в коксовой насадке	м ³ /сек

Таблица 2.8

Показатели теплового состояния печи

Обозначение	Наименование	Ед. изм.
$t_{КГ}^{расч}$	Температура колошникового газа (расчет)	°С
H_B	Высота верхней зоны теплообмена	м
i_B	Индекс верха	-
$Q_{пп}$	Затраты тепла на физический и химический нагрев продуктов плавки	кДж/т
Q_n	Показатель теплового состояния нижней зоны печи	кДж/т
$q_{г}$	Полезная тепловая мощность газового потока	кДж/мин
$Q_{пот}$	Потери тепла через кладку	кДж/т

3 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Процессы, протекающие в объеме доменной печи в конечном итоге, определяют показатели доменной плавки – удельный расход кокса и удельную производительность печи.

Удельный расход кокса ($K_{уд}$, т/т) – отношение суточного расхода кокса (M_K , т/сутки) к массе чугуна, рассчитывается на фактическое производство – производство товарного чугуна ($P_{сут}$, т/сутки):

$$K_{уд} = \frac{M_K}{P_{сут}}, \quad (3.1)$$

или на расчетное производство – теоретический выход чугуна (e , т/сутки):

$$K_{уд} = \frac{R_K}{e}. \quad (3.2)$$

Теоретический выход чугуна рассчитывается по балансу железа:

$$e = \frac{M_{ЖРМ} F e_{ЖРМ} \eta_{Fe}}{[Fe]}. \quad (3.3)$$

Здесь η_{Fe} – степень перехода железа в чугун, принимается равной 0,998.

Производство товарного чугуна и теоретический выход чугуна связаны между собой соотношением

$$e = P_{сут} \frac{(100 + \alpha_{пот})}{100}, \quad (3.4)$$

где $\alpha_{пот}$ – потери чугуна, %.

Для оценки **производительности доменной печи** (P , т/мин) применяют расчетные формулы, использующие разные группы информации о процессе:

1. Данные о суточном производстве товарного чугуна и потерях чугуна:

$$P = \frac{P_{сут}(1 + \alpha_{пот})}{1440}. \quad (3.5)$$

2. Данные о количестве проплавленного железа:

$$P = \frac{e}{1440}. \quad (3.6)$$

3. Данные об общем количестве углерода, поступающего с коксом, углеводородными добавками, и количестве углерода в колошниковом газе (баланс углерода):

$$P = \frac{V_{\text{КГ}} \frac{(\text{CO}^{\text{КГ}} + 2\text{CO}_2^{\text{КГ}})}{100} - (\text{C})_{\text{ПГ}} V_{\text{ПГ}} - (\text{C})_{\text{ПУТ}} G_{\text{ПУТ}}}{1,867 g_{\text{к}}} \quad (3.7)$$

4. Данные об общем количестве поступающего с дутьем и шихтой кислорода и количестве кислорода в колошниковом газе (баланс кислорода):

$$P = \frac{V_{\text{КГ}} \frac{(\text{CO}^{\text{КГ}} + 2\text{CO}_2^{\text{КГ}} + H_2^{\text{КГ}} \frac{1 - \eta_{H_2}}{\eta_{H_2}})}{100} - V_{\text{Д}} \left(\frac{20_{\text{Д}}^{\text{Д}}}{100} + \frac{22,4 H_2 O}{18000} \right)}{2\delta} \quad (3.8)$$

5. Данные о количестве газифицированного углерода кокса и поступающего с дутьем кислорода (баланс углерод-кислород):

$$P = \frac{V_{\text{Д}} \left(\frac{20_{\text{Д}}^{\text{Д}}}{100} + \frac{22,4 H_2 O}{18000} \right) - (\text{C})_{\text{ПГ}} V_{\text{ПГ}} - (\text{C})_{\text{ПУТ}} G_{\text{ПУТ}}}{1,867 g_{\text{к}} - 4[Fe]r_d - C_{\text{ПВ}}^{\text{эл}}} \quad (3.9)$$

Удельный выход шлака также может оцениваться с использованием разной информации о процессе:

1. По данным о количестве шлакообразующих оксидов

$$\text{Ш} = \frac{\sum \left(M_i \frac{X_{ij}}{100} \right) - 2,14 \frac{[Si]}{100}}{e} \quad (3.10)$$

где M_i – масса i -го компонента доменной шихты, т; X_{ij} – содержание j -го шлакообразующего оксида в i -м компоненте доменной шихты, %

2. По данным о содержании железа (Fe_i , %) и кислорода (O_i , %), связанного с восстанавливаемыми в чугуна оксидами железа, в i -м компоненте шихты:

$$\text{Ш} = \frac{\sum \left(M_i \frac{(100 - Fe_i - O_i)}{100} \right)}{e} - 0,0214e[Si]. \quad (3.11)$$

3. По балансу оксида кальция:

$$U = \frac{\sum(M_i \text{CaO}_i)}{e(\text{CaO})}, \quad (3.12)$$

где CaO_i , (CaO) – содержание оксида кальция в i -м шихтовом материале и шлаке соответственно, %.

Выход колошникового газа рассчитывается по балансу азота: азот является нейтральным газом, его количество в колошниковом газе определяется поступлением азота с дутьем

$$V_{\text{КГ}} = \frac{V_{\text{Д}} \left(1 - V_{\text{Д}} \frac{O_2^{\text{Д}}}{100} \right)}{\frac{N_2^{\text{КГ}}}{100}}. \quad (3.13)$$

Представленные уравнения используют разные группы информации о процессе, полученные значения показателей доменной плавки являются оценками их действительных значений. Различие оценок связано с разной достоверностью используемой информации. При этом надежной следует считать ту оценку, которая получена с использованием более достоверной информации.

Производительность печи позволяет оценить удельные расходы углеводородных добавок:

$$V_{\text{ПГ}}^{\text{уд}} = \frac{V_{\text{ПГ}}}{P}, \quad (3.14)$$

$$G_{\text{ПУТ}}^{\text{уд}} = \frac{G_{\text{ПУТ}}}{P}. \quad (3.15)$$

4 РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДУТЬЕВОГО РЕЖИМА

Задача расчета параметров дутьевого режима состоит в определении удельного расхода дутья, выхода и состава фурменных газов, теоретической температуры горения, размеров фурменного очага.

4.1 Удельный расход дутья

Удельный расход дутья ($V_D^{уд}$, м³/т) определяется потребностью процесса в кислороде для обеспечения процессов горения твердого топлива и углеводородных добавок при производстве 1 т чугуна ($V_{O_2}^{уд}$, м³/т) и содержанием кислорода в дутье

$$V_D^{уд} = \frac{V_{O_2}^{уд}}{0,01O_2^д} \quad (4.1)$$

В соответствии с реакцией неполного горения углерода потребность процесса в кислороде ($V_{O_2}^{уд}$, м³/т) рассчитывается по формуле:

$$V_{O_2}^{уд} = 0,5(C_{\Phi}^K + (C)_{ПГ}V_{ПГ}^{уд} + (C)_{ПУТ}G_{ПУТ}^{уд}). \quad (4.2)$$

Количество углерода кокса, пришедшее к фурмам, (C_{Φ}^K , кг/т) определяется количеством газифицированного углерода кокса (g_K , кг/т) за минусом расхода углерода кокса на прямое восстановление оксидов железа (C_d^{FeO} , м³/т) и примесей чугуна ($C_d^{эл}$, м³/т):

$$C_{\Phi}^K = g_K - C_d^{FeO} - C_d^{эл}, \quad (4.3)$$

$$g_K = K_{уд} \frac{C_K}{100} - 1000 \frac{[C]}{100}, \quad (4.4)$$

$$C_d^{FeO} = 1000 \frac{12 [Fe]}{56 \cdot 100} r_d = 2,14[Fe]r_d, \quad (4.5)$$

$$C_d^{эл} = 12 \left(\frac{[Mn]}{55} + \frac{2[Si]}{28} + \frac{5[P]}{2 \cdot 31} + \frac{2[Ti]}{48} + \frac{5[V]}{2 \cdot 51} \right). \quad (4.6)$$

4.2 Выход и состав фурменных газов

Выход фурменного газа ($V_{\Gamma}^{yд}$, м³/т) определяется количеством продуктов горения: монооксида углерода, водорода и азота ($V_{N_2}^{yд}, V_{CO}^{yд}, V_{H_2}^{yд}$, м³/т)

$$V_{\Gamma}^{yд} = V_{N_2}^{yд} + V_{CO}^{yд} + V_{H_2}^{yд}, \quad (4.7)$$

которые в свою очередь могут быть рассчитаны по формулам:

$$V_{N_2}^{yд} = V_{д}^{yд} \left(1 - 0,01 \frac{O_2^д}{100} \right), \quad (4.8)$$

$$V_{CO}^{yд} = V_{д}^{yд} \left(2 \frac{O_2^д}{100} + f_{д} \right), \quad (4.9)$$

$$V_{H_2}^{yд} = 2V_{\Pi\Gamma}^{yд} + V_{д}^{yд} f_{д}. \quad (4.10)$$

Здесь $f_{д}$ – количество паров воды в дутье, м³/м³:

$$f_{д} = \frac{H_2O^д}{1000} \frac{22,4}{18}. \quad (4.11)$$

С учетом уравнений (4.8) – (4.11) уравнение (4.7) может быть записано в виде

$$V_{\Gamma}^{yд} = V_{д}^{yд} \left(1 + \frac{O_2^д}{100} + 2f_{д} \right) + 2V_{\Pi\Gamma}^{yд}. \quad (4.12)$$

Состав фурменного газа рассчитывается по формулам:

$$N_{\Gamma}^{\Gamma} = 100 \frac{V_{N_2}^{yд}}{V_{\Gamma}^{yд}}, \quad CO_{\Gamma} = 100 \frac{V_{CO}^{yд}}{V_{\Gamma}^{yд}}, \quad H_2^{\Gamma} = 100 \frac{V_{H_2}^{yд}}{V_{\Gamma}^{yд}}. \quad (4.13)$$

4.3 Теоретическая температура горения

Расчет теоретической температуры горения основан на анализе теплового баланса зоны горения. Статьи теплового баланса:

1. Теплосодержание горячего дутья ($Q_{д}$, кДж/т)

$$Q_{д} = V_{д}^{yд} c_{д} t_{д} \quad (4.14)$$

где $c_{д}$ – теплоемкость дутья, кДж/кг·°С; $t_{д}$ – температура дутья, °С.

2. Тепловой эффект реакции горения ($Q_{гор}$, кДж/т)

$$Q_{гор} = 10500 V_{д}^{yд} \frac{O_2^д}{100}. \quad (4.15)$$

3. Затраты тепла на разложение влаги дутья ($Q_{вл}$, кДж/т)

$$Q_{вл} = -5540V_{д}^{уд}f_{д}. \quad (4.16)$$

4. Теплосодержание кокса ($Q_{к}$, кДж/т)

$$Q_{к} = K_{ф}c_{к}t_{к}, \quad (4.17)$$

где $K_{ф}$ – количество кокса, пришедшее к фурмам, кг/т; $c_{к}$ – теплоемкость кокса, кДж/кг·°С; $t_{к}$ – температура кокса, пришедшего к фурмам, 1500 °С.

Количество кокса, пришедшее к фурмам, может быть рассчитано по формуле:

$$K_{ф} = \frac{C_{ф}^к}{1,867} \frac{100}{C_{к}} + K_{уд} \frac{A_{к}}{100}. \quad (4.18)$$

5. Конверсия природного газа ($Q_{пг}$, кДж/т)

$$Q_{пг} = -6912V_{пг}^{уд}. \quad (4.19)$$

6. Теплосодержание пылеугольного топлива и затраты тепла на нагрев золы ПУТ до температуры продуктов горения ($Q_{пут}$, кДж/т)

$$Q_{пут} = G_{пут}^{уд}(c_{пут}t_{пут} - c_{пут}(t_{г} - t_{пут})0,01A_{пут}), \quad (4.20)$$

где $t_{пут}$ – температура пылеугольного топлива, 50 °С; $t_{г}$ – температура продуктов горения (теоретическая температура горения), °С.

7. Теплосодержание продуктов горения:

$$Q_{г} = t_{г}V_{г}^{уд}c_{г}. \quad (4.21)$$

Определив статьи теплового баланса зоны горения, по уравнению (4.21) можно рассчитать теоретическую температуру горения:

$$t_{г} = \frac{Q_{д} + Q_{гор} + Q_{вл} + Q_{к} + Q_{пг} + Q_{пут}}{V_{г}^{уд}c_{г}}. \quad (4.22)$$

4.4 Размеры фурменного очага

Размеры фурменного очага (понимаем под этим прежде всего протяженность циркуляционной, окислительной зон горения, а также относительную площадь окислительных зон) оказывают существенное влияние на характер движения газов и материалов.

Расчет характеристик фурменного очага построен на использовании эмпирических зависимостей для оценки протяженности циркуляционной и окислительной зон.

Для расчета протяженности зоны циркуляции (кислородной зоны) ($L_{ц}$, мм) можно рекомендовать следующие эмпирические зависимости:

$$L_{ц} = 122,26 + 0,329E_{кин} - 0,0000244E_{кин}^2, \quad E_{кин} \leq 6700; \quad (4.23)$$

$$L_{ц} = \frac{E_{кин}}{1,729 + 0,000562E_{кин}}, \quad E_{кин} > 6700. \quad (4.24)$$

Здесь, $E_{кин}$ – кинетическая энергия газа, истекающего из фурмы за единицу времени, (кгс*м)/с.

Для расчетного определения протяженности окислительной (углекислотной) зоны горения в первом приближении можно рекомендовать следующую взаимосвязь:

$$L_{ок} = 1,28L_{ц}. \quad (4.25)$$

Относительная площадь окислительных зон – площадь окислительных зон фурменного очага, отнесенная к поперечному сечению горна, рассчитывается по формуле:

$$S_{ок} = 0,9n_{ф} \left(\frac{0,001L_{ок}}{D_{г}} \right) (100 - \beta), \quad (4.26)$$

где 0,9 – коэффициент сжатия фурменного очага, β – степень перекрытия фурменных очагов, %.

Степень перекрытия фурменных очагов рассчитывается в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 4.1, по формулам (4.27) и (4.28):

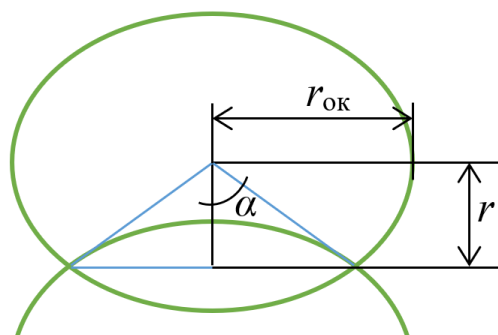


Рис. 4.1. – Схема для расчета степени перекрытия фурменных очагов

$$S_{\text{сер}} = 0,9r_{\text{ок}}^2 \arctg(0,9\text{tg}\alpha) - r^2\text{tg}\alpha,$$

$$\text{где } \alpha = \arctg\left(\sqrt{\frac{r_{\text{ок}}^2}{r^2} - \frac{1}{0,9^2}}\right) \quad (4.27)$$

$$\beta = \frac{2S_{\text{сер}}}{0,9\pi r_{\text{ок}}^2} 100 \quad (4.28)$$

Здесь, $r_{\text{ок}}$ – большой радиус эллипса, равный половине протяженности окислительной зоны, мм; r – половина расстояния между центрами фурменных очагов, мм, рассчитывается исходя из диаметра горна, протяженности окислительной зоны, количества фурм, высота фурмы.

Кинетическая энергия газа, истекающего из фурмы за единицу времени:

$$E_{\text{кин}} = \frac{m_{\text{гф}} w_{\text{гф}}^2}{2} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right] = \frac{m_{\text{гф}} w_{\text{гф}}^2}{2g} \left[\frac{\text{КГС} \cdot \text{М}}{\text{с}} \right]. \quad (4.29)$$

В приведенной формуле $m_{\text{гф}}$ и $w_{\text{гф}}$ – масса газа, истекающего из фурмы за единицу времени, и скорость газа, кг/с и м/с, соответственно.

Скорость истечения газовой смеси из фурмы определяется: расходом, параметрами дутья, равномерностью распределения газа по фурмам, степенью частичного сжигания углеводородных добавок в полости фурмы.

Тепловые эффекты горения углеводородных добавок в полости фурмы приводят к изменению количества ($V_{\text{гф}}^{\text{уд}}$, м³/т) и температуры газовой смеси ($t_{\text{гф}}$, °С), истекающей из фурмы.

$$V_{\text{гф}}^{\text{уд}} = (V_{\text{д}}^{\text{уд}} + V_{\text{пг}}^{\text{уд}} + \alpha_{\text{пг}}(\text{H}_2)_{\text{пг}} V_{\text{пг}}^{\text{уд}} + \alpha_{\text{пут}}(\text{H}_2)_{\text{пут}} G_{\text{пут}}^{\text{уд}}). \quad (4.30)$$

$$t_{\text{гф}} = \left[c_{\text{д}} t_{\text{д}} V_{\text{д}}^{\text{уд}} + \alpha_{\text{пг}} Q_{\text{нпг}}^{\text{р}} V_{\text{пг}}^{\text{уд}} + \alpha_{\text{пут}} Q_{\text{нпут}}^{\text{р}} G_{\text{пут}}^{\text{уд}} \right] / \left[c_{\text{гф}} V_{\text{гф}}^{\text{уд}} \right]. \quad (4.31)$$

Здесь, $\alpha_{\text{пг}}$, $Q_{\text{нпг}}^{\text{р}}$, $\alpha_{\text{пут}}$, $Q_{\text{нпут}}^{\text{р}}$ доля углеводородной добавки, сгораемая в полости фурмы, и тепловой эффект реакции горения (нормативно-справочная информация).

С учетом параметров газовой смеси (температуры и давления) действительный минутный расход ($V_{\text{гф}}^{\text{д}}$, м³/мин) составит:

$$V_{\text{гф}}^{\text{д}} = V_{\text{д}}^{\text{уд}} P \left(\frac{t_{\text{гф}} + 273}{273} \right) \left(\frac{1}{1 + P_{\text{д}}} \right). \quad (4.32)$$

Тогда, при условии равномерного распределения газа по фурмам, скорость истечения газовой смеси ($w_{гф}$, м/с) определится по формуле:

$$w_{гф} = \frac{V_{гф}^д}{3,14 \left(\frac{(0,001D_{ф})^2}{4} \right) n_{ф} 60}. \quad (4.33)$$

В случае установки фурм разного диаметра имеет место перераспределение расхода дутья по фурмам. При расчете скорости истечения дутья из фурм различного диаметра необходимо учитывать изменение расхода дутья через фурму по балансу дутья по фурмам (4.34) и равенству давления дутья перед фурмами и давления фурменного газа (4.35).

$$\sum (V_{д}^{уд})_i = V_{д}^{уд}, \quad (4.34)$$

$$(V_{д}^{уд})_i / (D_{ф})_i^2 = const. \quad (4.35)$$

Масса газовой смеси, истекающей из фурмы в единицу времени, ($m_{гф}$, кг/с) определится по формуле:

$$m_{гф} = \frac{V_{гф}^{уд} \rho_{гф}}{n_{ф} 60} P. \quad (4.36)$$

5 РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА

В технике для описания газодинамики слоевых процессов применяется уравнение, предложенное Эргоном:

$$\Delta P = \lambda \frac{H}{d_3} \frac{(1 - \varepsilon) w^2}{\varepsilon^3} \frac{\rho_0}{2} \frac{T_{cp}}{T_0} \frac{P_0}{P_{cp}}, \quad (5.1)$$

где ΔP – перепад давления газа по высоте слоя, Па; λ – коэффициент, характеризующий свойства поверхности куска; H – высота слоя, м; d_3 – эквивалентный диаметр куска, м; ε – порозность слоя, м³/м³; T_{cp} – средняя температура газа, К; P_{cp} – среднее давление газа, Па.

Условием равного схода шихтовых материалов является положительный активный вес шихты. В качестве технологического критерия активного веса шихты используют степень уравнивания шихты газовым потоком (СУ, %)

$$СУ = \frac{\Delta P}{98,1 H \rho_{ш}}. \quad (5.2)$$

Степень уравнивания, равная 55–60 %, является предельной, сверх которой наблюдается переход ровного схода шихты в неровное движение материалов, с появлением в локальных участках шихты газовых полостей и участков с повышенной порозностью.

Рассмотренные в данном разделе уравнения позволяют решать следующие задачи оценки газодинамического режима доменной плавки:

1. Расчет фактической степени уравнивания шихты газовым потоком и сопоставление ее с критическими значениями.
2. Определение критических значений перепада давления по высоте печи и соответствующего ему критического расхода дутья для заданных параметров шихты и комбинированного дутья.
3. Установление зависимости перепада давления от количества, подаваемого в печь для заданных параметров шихты и параметров комбинированного дутья.

5.1 Газодинамические характеристики шихтовых материалов

Доменная шихта относится к категории сыпучих сред. Важными характеристиками сыпучей среды являются эквивалентный диаметр, порозность, насыпная масса.

1. Эквивалентный диаметр кусков кокса, агломерата и шихты в целом определяется как среднегармоническое и осуществляется по формулам вида:

$$d = 1 / \sum \frac{\alpha_i}{d_i}, \quad (5.3)$$

где α_i – доля i -ой фракции, d_i – средний диаметр куска i -ой фракции, мм.

Для окатышей эквивалентный диаметр равен их среднему диаметру

$$d_{ок} = d_{ср}^{ок}. \quad (5.4)$$

2. Порозность шихтовых материалов

Для определения порозности кокса можно использовать известную формулу, устанавливающую зависимость порозности слоя от среднегармонического размера куска [9]:

$$\varepsilon_k = 0,222d_k^{0,252}. \quad (5.5)$$

Для окатышей, имеющих шарообразную форму, расчетная формула для определения порозности имеет следующий вид

$$\varepsilon_{ок} = 0,40 - 0,29\alpha_{-5}^{ок}. \quad (5.6)$$

Для расчета порозности слоя агломерата можно использовать уравнение, предложенное В.Н. Ковшовым [14]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_a = & 1 - (1 - \varepsilon_{кф})\alpha_{кф} - \\ & - \sum \left\{ (1 - \varepsilon_i)\alpha_i \left[1,582 - 2,416(d_i/d_{кф}) + 1,485(d_i/d_{кф})^2 \right. \right. \\ & \left. \left. + 0,18(\alpha_{кф}/\alpha_i) - 0,015(\alpha_{кф}/\alpha_i)^2 \right] \right\}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

В уравнении (5.7) $\alpha_{кф}$, α_i – доля крупной и i -ой фракции, соответственно; $d_{кф}$, d_i – средний диаметр куска крупной и i -ой фракции соответственно, мм; $\varepsilon_{кф}$, ε_i – порозность слоя крупной и i -ой фракции, соответственно.

При расчете порозности полидисперсного слоя агломерата по формуле (5.7) используются данные о порозности отдельных фракций (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Порозность различных фракций сыпучих материалов

Размер фракции, мм	0 – 5	5 – 10	10 – 25	25 – 40	40 – 60
Порозность фракции, м ³ /м ³	0,344	0,450	0,450	0,457	0,471

3. Насыпная масса шихтовых материалов

Для расчета насыпной массы шихтовых материалов используются следующие соотношения:

$$\text{– для кокса} \quad \gamma_k = 0,9(1 - \varepsilon_k); \quad (5.8)$$

$$\text{– для окатышей} \quad \gamma_{ок} = 2; \quad (5.9)$$

$$\text{– для агломерата} \quad \gamma_a = 2,76(1 - \varepsilon_a). \quad (5.10)$$

Значения насыпной массы и расходов шихтовых материалов позволяют определить объемные доли компонентов доменной шихты: агломерата (α_a , м³/м³), окатышей ($\alpha_{ок}$, м³/м³), кокса (α_k , м³/м³)

$$\alpha_a = \left(\frac{R_a}{\gamma_a} \right) / \left(\frac{R_a}{\gamma_a} + \frac{R_{ок}}{\gamma_{ок}} + \frac{R_k}{\gamma_k} \right); \quad (5.11)$$

$$\alpha_{ок} = \left(\frac{R_{ок}}{\gamma_{ок}} \right) / \left(\frac{R_a}{\gamma_a} + \frac{R_{ок}}{\gamma_{ок}} + \frac{R_k}{\gamma_k} \right); \quad (5.12)$$

$$\alpha_k = \left(\frac{R_k}{\gamma_k} \right) / \left(\frac{R_a}{\gamma_a} + \frac{R_{ок}}{\gamma_{ок}} + \frac{R_k}{\gamma_k} \right). \quad (5.13)$$

Расходы агломерата и окатышей определяются по формулам:

$$R_a = (1 - 0,01m_{ок})R_{ЖРМ}, \quad (5.14)$$

$$R_o = 0,01m_{ок}R_{ЖРМ}. \quad (5.15)$$

Порозность эквивалентный диаметр шихты в целом зависит от порозности слоя компонентов шихты и их объемной доли:

$$\varepsilon_{ш} = \alpha_a \varepsilon_a + \alpha_{ок} \varepsilon_{ок} + \alpha_k \varepsilon_k, \quad (5.16)$$

$$d_{ш} = 1 / \left(\frac{\alpha_a}{d_a} + \frac{\alpha_o}{d_o} + \frac{\alpha_k}{d_k} \right). \quad (5.17)$$

Насыпная масса шихты рассчитывается по формуле:

$$\gamma_{ш} = \alpha_a \gamma_a + \alpha_{ок} \gamma_{ок} + \alpha_k \gamma_k. \quad (5.18)$$

5.2 Анализ условий движения газов

Для анализа условий движения газа уравнения Эргона (5.1) целесообразно записать в виде:

$$\Delta P = \lambda H \Delta P_{\text{ш}} \Delta P_{\Gamma}, \quad (5.19)$$

где $\Delta P_{\text{ш}}$ – удельное газодинамическое сопротивление слоя шихтовых материалов; ΔP_{Γ} – параметр, характеризующий кинетическую энергию газового потока в расчете на свободное сечение шахты печи:

$$\Delta P_{\text{ш}} = \frac{1}{d_{\text{э}}} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3}, \quad (5.20)$$

$$\Delta P_{\Gamma} = \frac{\rho_0 w^2 T_{\text{ср}} P_0}{2 T_0 P_{\text{ср}}}. \quad (5.21)$$

и рассматривать его отдельно для верхней и нижней зон.

5.2.1 Верхняя зона печи

Верхний перепад давления ($\Delta P_{\text{в}}$) в доменной печи составляет 25–35 % от общего перепада давления по высоте печи. Принимая это значение равным 30 %, получим:

$$\Delta P_{\text{в}} = 0,3(P_{\text{д}} - P_{\text{кг}}). \quad (5.22)$$

Среднее давление в верхней зоне печи ($P_{\text{ср}}$, ат) составит

$$P_{\text{ср}} = 1 + P_{\text{кг}} + \frac{\Delta P_{\text{в}}}{2}. \quad (5.23)$$

Средняя температура в верхней зоне печи ($T_{\text{ср}}$, К) составит

$$T_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{кг}} + 900}{2} + 273. \quad (5.24)$$

Скорость фильтрации газа на пустое сечение шахты (w , м/с)

$$w = \frac{V_{\Gamma} + V_d}{S_{\text{ш}}}. \quad (5.25)$$

Здесь, V_d – выход газа, образующегося в процессе прямого восстановления железа и примесей чугуна из оксидов, м³/т; $S_{\text{ш}}$ – средняя площадь поперечного сечения шахты печи, м².

Выход газа, образующегося в процессе прямого восстановления железа и примесей чугуна из оксидов, определяется составом чугуна и степенью прямого восстановления оксидов железа и равно расходу углерода кокса на прямое восстановление оксидов железа и примесей чугуна:

$$V_d = C_d^{\text{FeO}} + C_d^{\text{эл}}. \quad (5.26)$$

Среднюю площадь поперечного сечения шахты печи можно рассчитать, зная параметры профиля печи, или приблизительно оценить как отношение объема шахты печи к ее высоте:

$$S_{\text{ш}} = \frac{V_{\text{ш}}}{H_{\text{ш}}}. \quad (5.27)$$

5.2.2 Нижняя зона печи

Нижний перепад давления, составляющий 65–75 % от общего перепада давления во многом определяется порозностью коксовой насадки, величина которой зависит от удельного расхода кокса (K , кг/т) и выхода шлака (Ш , кг/т):

$$\varepsilon_{\text{кн}} = \frac{\frac{K\varepsilon_{\text{к}} - \text{Ш}}{\gamma_{\text{к}} \rho_{\text{ш}}}}{\frac{K}{\gamma_{\text{к}}}}. \quad (5.28)$$

Подходы к оценке удельного выхода шлака и удельного расхода кокса изложены в разделе 3.

Влияние удельного расхода кокса и выхода шлака на удельное газодинамическое сопротивление в нижней зоне печи оценивается через порозность коксовой насадки:

$$\Delta P_{\text{ш}} = \frac{1}{d_{\text{к}}} \frac{(1 - \varepsilon_{\text{кн}})}{\varepsilon_{\text{кн}}^3}. \quad (5.29)$$

Нижний перепад давления ($\Delta P_{\text{н}}$) в доменной печи составит:

$$\Delta P_{\text{н}} = 0,7(P_{\text{д}} - P_{\text{кг}}). \quad (5.30)$$

Среднее давление в нижней зоне печи ($P_{\text{ср}}$, ат) определится по формуле:

$$P_{\text{ср}} = 1 + P_{\text{д}} + \frac{\Delta P_{\text{н}}}{2}. \quad (5.31)$$

Средняя температура в верхней зоне печи ($T_{\text{ср}}$, К) составит

$$T_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{г}} + 900}{2} + 273. \quad (5.32)$$

Скорость фильтрации газа на пустое сечение шахты (w , м/с) можно оценить по формуле:

$$w = \frac{V_{\text{г}} + 0,5V_d}{S_{\text{г}}}. \quad (5.33)$$

Среднюю площадь поперечного сечения нижней зоны печи ($S_{\text{г}}$) можно рассчитать, зная параметры профиля печи.

Устойчивый ход доменной печи во многом определяется поведением шлака в коксовой насадке. Параметрами, характеризующими поведение шлака в коксовой насадке, являются плотность орошения коксовой насадки – отношение объемного расхода шлака к площади ($\rho_{\text{орош}}$, м/мин), и скорость фильтрации шлака в коксовой насадке – количество шлакового расплава, проходящего через коксовую насадку в единицу времени ($V_{\text{шл}}$, м³/сек).

Плотность орошения коксовой насадки рассчитывается по формуле:

$$\rho_{\text{орош}} = \text{Ш}\rho_{\text{ш}}P/S_{\text{р}}, \quad (5.34)$$

где $S_{\text{р}}$ – площадь коксовой насадки в рассматриваемом сечении, м².

В основе методики расчета плотности орошения коксовой насадки лежит уравнение Пуазейля, устанавливающее взаимосвязь между количеством жидкости, проходящей через один канал круглого сечения (v , м³/м²сек) и свойствами жидкости:

$$v = \frac{\pi r_{\text{канала}}^4 P_{\text{ст}}}{8\eta l_{\text{канала}}}, \quad (5.35)$$

где $r_{\text{канала}}$ – радиус канала, м; $l_{\text{канала}}$ – длина канала, м; $P_{\text{ст}}$ – гидростатическое давление жидкости на входе в канал, Па; η – вязкость жидкости, Па·с.

При определении гидростатического давления принимаем высоту столба жидкости равной половине диаметра куска. Это соответствует закономерностям полного опорожнения емкости при условии отсутствия в нее притока новых порций жидкости. В этом случае для определения $P_{\text{ст}}$ можно записать уравнение:

$$P_{ст} = g\rho d_{\varepsilon}, \quad (5.36)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; d_{ε} – эквивалентный диаметр куска, м.

Количество шлакового расплава, проходящего через коксовую насадку в единицу времени в рассматриваемом сечении ($V_{шл}$, м³/сек) определится уравнением:

$$V_{шл} = S_p n v, \quad (5.37)$$

где n – количество каналов на одном квадратном метре коксовой насадки.

Принимая допущение о равенстве длины канала, через который движется шлак, половине эквивалентного диаметра куска кокса ($l_{канала} = d_k/2$) и используя для расчета среднего диаметра канала формулу Ф.Ф. Колесанова [18]:

$$d_{канала} = d_k \sqrt{\frac{S_{эфф}}{1 - S_{эфф}}}, \quad (5.38)$$

где $S_{эфф}$ – эффективная площадь коксовой насадки, м²/м², рассчитываемая по формуле

$$S_{эфф} = k\varepsilon_k, \quad (5.39)$$

где ε_k – порозность слоя кокса, м³/м³; k – коэффициент, определяемый по уравнению

$$k = 0,298 + 1,3d_k, \quad (5.40)$$

определяем количество каналов в рассматриваемом сечении коксовой насадки:

$$n = \frac{S_{эфф}}{\pi r_{канала}^2}. \quad (5.41)$$

С учетом приведенных выше формул уравнение (5.37) примет следующий вид:

$$V_{шл} = S_p \frac{d_k}{16} \frac{(k\varepsilon_k)^2}{(1 - k\varepsilon_k)} \frac{g\rho_{шл}}{\eta_{шл}}. \quad (5.42)$$

Из приведенного уравнения видно, что газодинамическая напряженность зоны фильтрации расплава определяется диаметром кусков кокса, вязкостью и плотностью шлака.

6 РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА

6.1 Первичный шлак

Процессы шлакообразования начинаются с размягчения и плавления оксидной составляющей железорудных материалов. Основным фактором, определяющим температуру начала плавления железорудных материалов, является содержание вюстита в оксидной системе. Приблизительно влияние содержания FeO на температуру плавления оксидной системы можно оценить по уравнениям (6.1) – (6.3), полученным в результате аппроксимации эмпирических данных, приведенных в работе [15], (рис. 6.1).

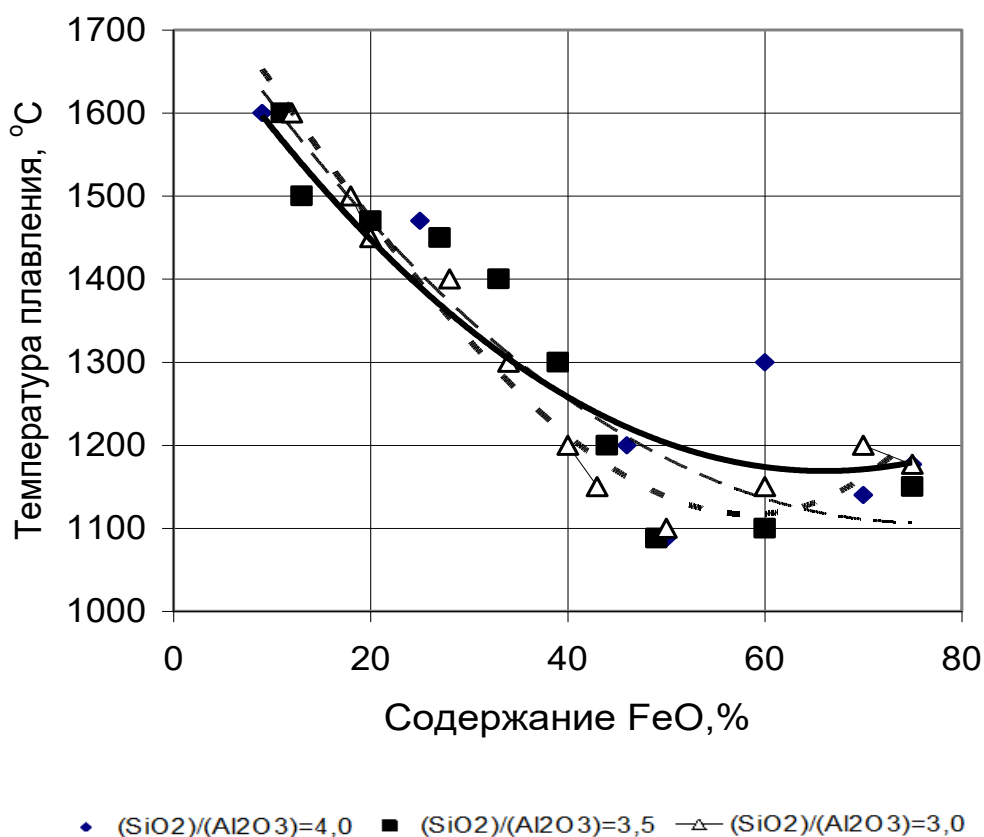


Рис. 6.1 – Зависимости температуры плавления системы SiO₂-Al₂O₃-FeO от содержания FeO при различном отношении SiO₂/Al₂O₃ [15].

Результаты аппроксимации экспериментальных зависимостей температуры плавления оксидной системы от содержания FeO:

$$\text{при } \frac{SiO_2}{Al_2O_3} = 4,0 \quad t_{\text{пл}} = 1754 - 15,42FeO + 0,105FeO^2; \quad (6.1)$$

$$\text{при } \frac{SiO_2}{Al_2O_3} = 3,5 \quad t_{\text{пл}} = 1794 - 18,55FeO + 0,126FeO^2; \quad (6.2)$$

$$\text{при } \frac{SiO_2}{Al_2O_3} = 3,0 \quad t_{\text{пл}} = 1922 - 27,91FeO + 0,248FeO^2. \quad (6.3)$$

Эти уравнения могут быть использованы для оценки температуры начала плавления оксидной системы.

При этом содержание FeO в оксидной системе определяется составом пустой породы железорудных материалов и долей железа, восстановленного из оксидов. Принимая допущение о степени прямого восстановления оксидов железа в «сухой» части печи равной 50-60 % от общей степени прямого восстановления вюстита расчет содержания FeO может быть выполнен по уравнению

$$(FeO)^{\text{II}} = 100 \frac{\frac{72}{56} Fe(1 - r_d^{\text{сyx}})}{\frac{72}{56} Fe(1 - r_d^{\text{сyx}}) + CaO + SiO_2 + Al_2O_3 + MgO}. \quad (6.4)$$

Кроме того, температура начала плавления железорудных материалов может быть рассчитана также по эмпирическому уравнению, описанному в работах [16, 17].

$$t_{\text{н.пл.}} = 1085,3 + 63,8 \frac{CaO}{SiO_2} + 25,3MgO - 13,8Al_2O_3 - 0,2FeO - 11,6MnO, \quad (6.5)$$

где CaO, SiO₂, MgO, Al₂O₃, FeO, MnO – содержание соответствующих оксидов в железорудном материале, %.

Уравнение (6.5) позволяет оценить влияние на температуру начала плавления состава пустой породы ЖРМ при постоянстве содержания железа. Влияние содержания железа в ЖРМ может быть оценено по уравнениям (6.1) – (6.4).

На горизонте печи с температурой равной температуре начала плавления оксидной системы образуются первые порции оксидного расплава — первичный шлак.

6.2 Промежуточный шлак

Особенностью состава промежуточных шлаков является снижение концентрации FeO и MnO. При этом до горизонта фурм успевают восстановиться почти все входившее в первичный шлак железо и значительная часть марганца.

За условную температуру плавления шлака принимают температуру, при которой шлак начинает свободно вытекать из коксовой насадки, то есть скорость движения шлака начинает превышать скорость движения коксовой насадки. Это возможно при вязкости шлака $2,5 \text{ н/м}^2\text{с}$.

Температура начала плавления железорудных материалов (раздел 6.1) совместно с условной температурой плавления шлака ($t_{\text{обр.ш.}}, ^\circ\text{C}$) определяют температурный интервал зоны вязко-пластичного состояния ($\Delta t_{\text{ВПС}}, ^\circ\text{C}$).

$$\Delta t_{\text{ВПС}} = t_{\text{н.пл.}} - t_{\text{обр.ш.}} \quad (6.6)$$

Определение $t_{\text{обр.ш.}}$ основано на анализе политермы вязкости конечного шлака (раздел 6.3).

6.3 Конечный шлак

Важнейшими физико-химическими свойствами конечного доменного шлака, влияющими на ход и результаты доменной плавки, являются:

- температура плавления шлака;
- вязкость;
- десульфурierende способность.

Температура плавления шлака определяет температурный интервал его плавления и тем самым высоту зоны вязкопластичного состояния шихтовых материалов. Вязкость шлака определяет характер его движения по коксовой насадке, степень заполнения коксовой насадки шлаком, газодинамическое сопротивление столба шихтовых материалов. От сероулавливающей способности шлака зависит качество получаемого чугуна.

Физико-химические свойства шлака определяются его химическим составом. Основную массу доменного шлака составляют три компонента: CaO, SiO₂, Al₂O₃ – их суммарное содержание составляет около 90 %. Свойства трехкомпонентной системы CaO–SiO₂–Al₂O₃ хорошо изучены. Температуры плавления, вязкости этих систем представлены на диаграммах плавкости и вязкости [9].

Для автоматизированного определения вязкости шлака при решении инженерных задач диаграммы могут быть оцифрованы в области реальных доменных шлаков. Пример обработки области диаграммы, соответствующей типовым составам доменных шлаков, методом интерполяции приведен ниже:

$$\eta_{1400} = -14,65(\text{CaO})' + 5,916(\text{SiO}_2)' - 3,723(\text{Al}_2\text{O}_3)' + 463,470 \frac{(\text{CaO})'}{(\text{SiO}_2)'} - 21,918 \left(\frac{(\text{CaO})'}{(\text{SiO}_2)'} \right)^2, \quad (6.7)$$

$$\eta_{1500} = 2,771(\text{CaO})' - 0,044(\text{SiO}_2)' + 1,640(\text{Al}_2\text{O}_3)' - 187,250 \frac{(\text{CaO})'}{(\text{SiO}_2)'} + 54,130 \left(\frac{(\text{CaO})'}{(\text{SiO}_2)'} \right)^2. \quad (6.8)$$

Здесь η_{1400} , η_{1500} – вязкость шлака при температуре 1400 и 1500 °С, соответственно, Пуаз.

Для технологов большой интерес представляет зависимость вязкости шлака от температуры (политерма вязкости). Известно, что для гомогенных жидкостей зависимость вязкости от температуры описывается уравнением Ньютона

$$\eta = A \cdot \exp\left(\frac{E}{RT}\right), \quad (6.9)$$

где E – энергия активации вязкого течения, кДж/моль; T – температура, К; A – постоянная (зависит от состава жидкости); R – газовая постоянная, кДж/(моль·К).

Шлак является гетерогенной системой, и поэтому понятие «вязкость шлака» имеет условное значение, а уравнение зависимости вязкости от температуры может быть использовано только в первом приближении. Но, как

правило, для решения практических задач ведения доменной плавки этого достаточно. Для применения на практике уравнение зависимости вязкости от температуры может быть аппроксимировано уравнением следующего вида:

$$\log(\log \eta) = A + Bt, \quad (6.10)$$

где A, B – коэффициенты, зависящие от состава шлака; t – температура шлака, °С; η – вязкость шлака, Пуаз.

Значения коэффициентов A и B определяются в результате решения системы уравнений (6.10), записанных для двух температур – 1400 и 1500 °С.

Политерма вязкости позволяет определить вязкость шлака при температуре выпуска, которая является важным параметром, определяющим режим выпуска продуктов плавки. Вязкость нормальных доменных шлаков при температуре выпуска не должна превышать 7 Пуаз. Как правило, температура шлака на выпуске ($\eta_{\text{вып}}$, °С) превышает температуру чугуна на 50 °С.

Политерма вязкости шлака позволяет также рассчитать условную температуру плавления шлака ($t_{\text{пл}}$, °С) – температуру шлака при которой он имеет вязкость 25 Пуаз (раздел 6.2),

$$t_{\text{пл}} = \frac{\log(\log 25) - A}{B}. \quad (6.11)$$

Градиент вязкости шлака ($\text{grad } \eta$, Пуаз/ °С) в диапазоне температура плавления шлака – температура выпуска шлака рассчитывается по уравнению (6.12) и характеризует устойчивость шлака

$$\text{grad } \eta = \frac{25 - \eta_{\text{вып}}}{t_{\text{пл}} - 1500}. \quad (6.12)$$

Десульфуряющая способность шлака характеризуется коэффициентом распределения серы между шлаком и чугуном (L_S , доли единиц):

$$L_S = \frac{(S)}{[S]} \quad (6.13)$$

Зная поступление серы с шихтовыми материалами, состав и выход шлака, с помощью коэффициента L_S несложно рассчитать возможное содержание серы в чугуне по формуле, полученной из уравнения материального баланса серы:

$$[S] = 100 \frac{(1 - 0,01\lambda_s) \sum \left(\frac{R_i}{1000} \frac{S_i}{100} \right)}{1 + \frac{\text{III}}{1000} L_S}. \quad (6.14)$$

Здесь, R_i, S_i – удельный расход i -го компонента шихты и содержание в нем серы, кг/т и %, соответственно; λ_s – степень улетучивания серы, 5-10 %.

Значение L_S обычно определяется по эмпирическим соотношениям. Оценка влияния состава шлака на коэффициент распределения серы при температуре 1450 °С может быть выполнена по формуле В.Г. Воскобойникова [2]:

$$L_S^{1450} = 98x^2 - 160x + 72 - [0,6(\text{Al}_2\text{O}_3) - 0,012(\text{Al}_2\text{O}_3)^2 - 4,032]x^4, \quad (6.15)$$

$$x = \frac{(\text{CaO}) + (\text{MgO}) + (\text{MnO})}{(\text{SiO}_2)}. \quad (6.16)$$

При изменении температуры шлака вводят поправочный коэффициент $\xi_{t_{\text{шл}}}$:

$$L_S^{t_{\text{шл}}} = \xi_{t_{\text{шл}}} L_S^{1450}, \quad (6.17)$$

Для шлаков, содержащих 8-19% Al_2O_3 , величина $\xi_{t_{\text{шл}}}$ вычисляется по следующим формулам:

$$\xi_{t_{\text{шл}}} = 2,0 \left(\frac{t_{\text{шл}}}{100} \right) - 0,05 \left(\frac{t_{\text{шл}}}{100} \right)^2 - 17,475 \text{ при } \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO}}{\text{SiO}_2} = 0,80 - 1,25, \quad (6.18)$$

$$\xi_{t_{\text{шл}}} = 2,7 \left(\frac{t_{\text{шл}}}{100} \right) - 0,06 \left(\frac{t_{\text{шл}}}{100} \right)^2 - 24,063 \text{ при } \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO}}{\text{SiO}_2} = 1,25 - 1,60, \quad (6.19)$$

где $t_{\text{шл}}$ – температура шлака, °С;

Для расчета равновесной степени распределения серы применима формула И.С. Куликова [2]

$$\log L_S^0 = 2,44B + \log \left(\frac{f_{[S]}}{p_{\text{CO}}} \right) - 2,07, \quad (6.20)$$

где B – обобщенная основность; $f_{[S]}$ – коэффициент активности серы в чугуне; p_{CO} – парциальное давление монооксида углерода в горновом газе.

Величины, входящие в уравнение (6.20), рассчитываются по формулам

$$B = \frac{(CaO) + \alpha(MgO) + \beta(MnO)}{(SiO_2) + 0,6(Al_2O_3) \left\{ \frac{(CaO) + \alpha(MgO) + \beta(MnO)}{(SiO_2)} - 1,19 \right\}} \quad (6.21)$$

$$\alpha = [1,84(SiO_2) - 0,9(CaO)] / [(SiO_2) + 0,9(MgO)], \quad (6.22)$$

β зависит от величины B ; значениям $B = 0,8; 1,0; 1,2; 1,4$ соответствуют $\beta = 3,0; 2,5; 2,0; 1,5$, соответственно.

$$\log f_S = 0,11[C]_{\text{э}} + 0,006[C]_{\text{э}}, \quad (6.23)$$

где $[C]_{\text{э}}$ – эквивалентное содержание углерода в чугунае, %, определяется составом чугуна:

$$[C]_{\text{э}} = [C] + 0,63[Si] + 0,40[P], \quad (6.24)$$

Парциальное давление CO определяется давлением и составом дутья:

$$p_{CO} = 0,01(1 + P_d) \frac{2O_2^{\text{д}}}{(O_2^{\text{д}} + (100 - O_2^{\text{д}}))}, \quad (6.25)$$

7 РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПЕЧИ

7.1 Понятие теплового состояния доменной печи

В общем случае тепловое состояние характеризуется распределением температур встречных потоков газов и материалов в объеме печи. Установившееся в результате теплообмена температурное поле доменной печи определяет развитие основных процессов доменной плавки: восстановление железа и других элементов, формирование состава продуктов плавки, явления в зоне вязкопластического состояния.

В основу математического описания теплового состояния доменной печи положена концепция двухступенчатого развития процессов теплообмена, предложенная проф. Б. И. Китаевым и развитая его учениками.

При анализе теплового состояния необходимо учитывать следующее:

1. Тепловое состояние доменной печи целесообразно рассматривать отдельно для верхней и нижней зон печи.
2. Верхняя зона печи определяет развитие реакций косвенного восстановления оксидов железа.
3. Нижняя зона печи определяет состав чугуна и его температуру.

Математическим моделированием и экспериментальными исследованиями доказано, что влияние температурного поля верха доменной печи на показатели доменной плавки с достаточной для практического применения точностью может быть оценено через степень прямого восстановления оксидов железа. Тем самым результаты доменной плавки увязываются с режимными параметрами и закономерностями тепло- и массообмена в шахте печи.

7.2 Тепловое состояние верха печи

В соответствии с закономерностями противоточного теплообмена отношение изменений температур газа (Δt_{Γ}) и материала ($\Delta t_{\text{М}}$) определяется отношением теплоемкостей потоков:

$$\frac{\Delta t_{\Gamma}}{\Delta t_{\text{М}}} = \frac{W_{\text{М}}}{W_{\Gamma}}. \quad (7.1)$$

Здесь W_{Γ} – теплоемкость потока газов, кДж/мин·°С; $W_{\text{М}}$ – теплоемкость потока материала, кДж/мин·°С.

Если в слоевом процессе в ходе протекающих химических реакций выделяется или поглощается тепло, то тепловой эффект реакций относят к теплоемкости потока материала и используют понятие кажущейся теплоемкости

$$c_{\text{каж}} = c_{\text{М}} + \sum \frac{q_{\text{хим}i}}{\Delta t_i}, \quad (7.2)$$

где $c_{\text{каж}}$ – кажущаяся удельная теплоемкость материала, кДж/кг·°С; $c_{\text{М}}$ – удельная теплоемкость материала, кДж/кг·°С; $q_{\text{хим}i}$ – тепловой эффект i -ой химической реакции, протекающей в интервале температуры Δt , кДж/кг.

В доменной печи за счет теплового эффекта эндотермических реакций и в первую очередь за счет реакции газификации углерода кокса



отношение теплоемкостей потоков по мере опускания материалов возрастает и при определенных условиях становится равным 1. Эти условия определяют границу раздела верхней и нижней зон печи.

Среднее для верхней зоны печи отношение теплоемкостей потоков шихты и газа (m) в зависимости от их значений на колошнике ($W_{\text{Ш}}^{\text{К}}$, $W_{\Gamma}^{\text{К}}$) рассчитывается по уравнениям (7.4) – (7.7)

$$m = 0,5 \left(1 + \frac{W_{\text{Ш}}^{\text{К}}}{W_{\Gamma}^{\text{К}}} \right), \quad (7.4)$$

$$W_{\Gamma}^{\text{К}} = V_{\text{КГ}} c_{\text{КГ}}, \quad (7.5)$$

$$V_{\text{КГ}} = \frac{V_{\text{Д}}(1 + w)}{P} + 2V_{\text{ПГ}} + 4r_{\text{д}}[Fe], \quad (7.6)$$

$$W_{\text{Ш}}^{\text{к}} = \frac{(R_{\text{ЖРМ}}c_{\text{ЖРМ}} + R_{\text{К}}c_{\text{К}})P}{1440}. \quad (7.7)$$

Принимая во внимание завершенность теплообмена в верхней зоне печи, отношение изменения температур шихты и газа определяется температурой колошниковога газа ($t_{\text{КГ}}$, °C), средней температурой загружаемых в печь шихтовых материалов ($t_{\text{ШК}}$, °C) и температурой раздела верхней и нижней зон доменной печи (t_0 , °C),

$$\frac{\Delta t_{\text{Г}}}{\Delta t_{\text{Ш}}} = \frac{t_0 - t_{\text{КГ}}}{t_0 - t_{\text{ШК}}}. \quad (7.8)$$

Совместное решение уравнений (7.1), (7.4) и (7.8) позволяет получить выражение для расчета температуры колошниковога газа

$$t_{\text{КГ}}^{\text{расч}} = t_0 - m(t_0 - t_{\text{ШК}}). \quad (7.9)$$

В качестве количественного показателя характера распределения температур принят индекс температурного поля верхней зоны печи ($i_{\text{В}}$), определяемый как отношение средней по массе температуры шихтовых материалов в этой зоне к температуре на границе раздела верхней и нижней зон. В соответствии с закономерностями противоточного теплообмена в плотном слое конечное выражение $i_{\text{В}}$ через параметры текущего контроля хода доменного процесса будет иметь следующий вид:

$$i_{\text{В}} = \frac{t_{\text{КГ}} - mt_{\text{ШК}} - \frac{1}{B}(t_{\text{КГ}} - t_{\text{ШК}})(1 - \exp(-B))}{t_{\text{КГ}} - mt_{\text{ШК}} - (t_{\text{КГ}} - t_{\text{ШК}})\exp(-B)}, \quad (7.10)$$

где B – показатель интенсивности теплообмена в верхней части печи, доли ед., определяемый по выражению

$$B = \frac{\alpha_v S_{\text{Ш}}}{W_{\text{Ш}}^{\text{к}}} (1 - m) H_{\text{В}}. \quad (7.11)$$

Высота верхней зоны печи рассчитывается по формуле:

$$H_{\text{В}} = \frac{3W_{\text{Г}}^{\text{к}}(1 - m)}{\alpha_v}, \quad (7.12)$$

В приведенных выше формулах α_v – средний для верхней зоны печи объемный коэффициент теплообмена между потоками шихты и газа, Вт/м³·К, в расчетах принимается по справочным данным.

7.3 Тепловое состояние низа печи

Химический состав и температура продуктов плавки определяются тепловым состоянием нижней зоны печи, которое оценивается с использованием теплового баланса: затраты тепла на физический и химический нагрев жидких продуктов плавки ($Q_{пп}$, кДж/т) равны количеству тепла в нижней зоне печи, оцениваемому как показатель теплового состояния низа печи (Q_n , кДж/т)

$$Q_n = Q_{пп}. \quad (7.13)$$

Затраты тепла на физический и химический нагрев жидких продуктов плавки определяются температурой чугуна и шлака, выходом шлака, теплом, затраченным на восстановление трудновосстановимых примесей, и рассчитываются по формуле

$$Q_{пп} = 1000c_{ч}t_{ч} + c_{шл}t_{шл}Ш + 10 \sum q_{[X]_i}[X]_i + q_{(S)}Ш(S)0,01. \quad (7.14)$$

Здесь $[X]_i$ – содержание i -ой примеси в чугуне, %; $q_{[X]_i}$ – тепловой эффект восстановления i -ой примеси, кДж/кг; $q_{(S)}$ – тепловой эффект реакции десульфурации, кДж/кг.

Показатель теплового состояния нижней зоны печи учитывает физическое тепло нагретого дутья, тепло горения топлива на фурмах, затраты тепла на прямое восстановление FeO, тепло уходящее из нижней зоны печи с газами и тепловые потери в нижней зоне печи. Уравнение для расчета Q_n имеет следующий вид:

$$Q_n = \frac{q_{\Gamma}}{P} + Q_{Ш} - 31750[Fe]r_d - Q_{пот}. \quad (7.15)$$

Здесь $Q_{Ш}$ – тепло, вносимое шихтой в нижнюю зону доменной печи, кДж/т:

$$Q_{Ш} = \frac{R_{ЖРМ}C_{ЖРМ} + R_{КСК}}{1440P} t_0. \quad (7.16)$$

Полезная тепловая мощность газового потока учитывает тепло, вносимое нагретым дутьем, тепло от окисления углерода топлива кислородом, затраты тепла на диссоциацию углеводородов и тепло, уходящее из нижней зоны доменной печи с горновыми газами и может быть рассчитана с привлечением результатов расчета теплосодержания фурменных газов (Q_{Γ} , кДж/мин) (раздел 4.3) по уравнению:

$$q_{\Gamma} = Q_{\Gamma} - q_{\text{ух.}\Gamma}, \quad (7.17)$$

где $q_{\text{ух.}\Gamma}$ – расход тепла с газами, уходящими из нижней зоны доменной печи, кДж/мин:

$$q_{\text{ух.}\Gamma} = \{V_{\text{д}}[2\omega_{\text{д}}c_{\text{CO}}^{t_0} + f_{\text{д}}(c_{\text{H}_2}^{t_0} + c_{\text{CO}}^{t_0}) + (1 - \omega_{\text{д}})c_{\text{N}_2}^{t_0}] + 2V_{\text{пр}}c_{\text{H}_2}^{t_0}\}t_0. \quad (7.18)$$

Здесь $c_{\text{CO}}^{t_0}$, $c_{\text{H}_2}^{t_0}$, $c_{\text{N}_2}^{t_0}$ – теплоемкость соответствующего газа при температуре t_0 , кДж/м³·°С.

Потери тепла через кладку ($Q_{\text{пот}}$) во многом определяются интенсивностью плавки. А. Д. Готлиб для определения потерь тепла предложил уравнение [19]:

$$Q_{\text{пот}} = \frac{kD_{\Gamma}}{1440P}. \quad (7.19)$$

Здесь k – коэффициент, определяемый по формуле (7.20), используя фактические данные о работе печи за устойчивый период

$$k = \left(\frac{q_{\Gamma}}{P} + Q_{\text{ш}} - 31750[\text{Fe}]r_d - Q_{\text{пп}} \right) \frac{1440P}{D_{\Gamma}}. \quad (7.20)$$

Далее принимается допущение о постоянстве этого параметра.

Тепловой баланс для непрерывных процессов, к которым относится доменный процесс, принято составлять в расчете на единицу готовой продукции. Многие входные параметры процесса, например, расходы шихты, дутья, углеводородных добавок измеряются в единицу времени. Для определения удельных расходов необходимо знать производительность печи. Подходы к оценке производительности печи и ее зависимости от параметров плавки изложены в разделе 3.

8 РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИХ РАЗВИТИЕ ПРОЦЕССОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА

Критерии, характеризующие ход восстановительного процесса:

1. Показатели, характеризующие степень использования восстановительного потенциала газового потока и оцениваемые по составу колошникового газа:

1.1. Степень использования восстановительной способности монооксида углерода

$$\eta_{\text{CO}} = \frac{\text{CO}_2}{\text{CO} + \text{CO}_2}. \quad (8.1)$$

1.2. Степень использования восстановительной способности водорода

$$\eta_{\text{H}_2} = \frac{\text{H}_2\text{O}}{\text{H}_2 + \text{H}_2\text{O}}. \quad (8.2)$$

2. Показатели, характеризующие развитие реакций прямого и косвенного восстановления оксидов железа. Физический смысл показателей определяется методом их оценки.

2.1. Показатели, расчет которых основан на балансе углерода: степень прямого и косвенного восстановления железа – доля оксидов железа, восстановленных прямым и косвенным путем, соответственно (r_d , r_i).

2.2. Показатели, расчет которых основан на балансе кислорода: индексы прямого и косвенного восстановления – доля кислорода, связанного в оксидах железа, переходящая в газ в ходе прямого и косвенного восстановления, соответственно (R_d , R_i).

Между собой показатели относительного развития реакций прямого и косвенного восстановления связаны соотношениями [8]:

$$r_i = 1 - r_d, \quad (8.3)$$

$$R_i = 1 - R_d, \quad (8.4)$$

$$r_d = 1,45R_d - 0,06. \quad (8.5)$$

При расчете степеней использования восстановительного потенциала монооксида углерода и водорода по составу колошникового газа (8.1), (8.2)

необходимо иметь ввиду, что состав колошникового газа отражает развитие реакций косвенного восстановления всех оксидов железа, включая восстановление высших оксидов, полностью восстанавливаемых косвенным путем, а также учитывает количество CO_2 и H_2O , образующееся в результате разложения гидратов и карбонатов. При выполнении технологических расчетов, принимая во внимание использование в доменной плавке подготовленного железорудного дутья последним фактором можно пренебречь.

Учитывая соотношение количеств монооксида углерода и водорода в восстановительном газе и термодинамику восстановления оксидов железа CO и H_2 при температуре ниже 810°C , принимают также допущение о доминирующем влиянии на косвенное восстановление оксидов железа реакции восстановления монооксидом углерода. Тогда, при расчете степени использования восстановительного потенциала CO при восстановлении FeO из количества CO_2 в колошниковом газе вычитается количество CO_2 , образующегося при восстановлении высших оксидов железорудных материалов:

$$\eta_{\text{CO}}^{\text{FeO}} = \frac{\text{CO}_2^{\text{КГ}} - 100 \frac{2\delta^*P}{V_{\text{КГ}}}}{\text{CO}^{\text{КГ}} + \text{CO}_2^{\text{КГ}}}, \quad (8.6)$$

или

$$\eta_{\text{CO}} = \eta_{\text{CO}}^{\text{FeO}} + \frac{2\delta^*P}{V_{\text{C}}^{\Sigma}}, \quad (8.7)$$

где $\eta_{\text{CO}}^{\text{FeO}}$ – степень использования восстановительного потенциала монооксида углерода при восстановлении вюститита; $V_{\text{КГ}}$ – выход колошникового газа, $\text{м}^3/\text{мин}$; δ^* – удельное количество кислорода, связанного в высших оксидах железа, $\text{м}^3/\text{т}$; V_{C}^{Σ} – суммарное количество углерода в колошниковом газе, $\text{м}^3/\text{т}$:

$$V_{\text{C}}^{\Sigma} = V_{\text{КГ}} \frac{(\text{CO}^{\text{КГ}} + \text{CO}_2^{\text{КГ}})}{100}. \quad (8.8)$$

Удельное количество кислорода, связанного в высших оксидах железа, определяется расходом и составом железорудного материала:

$$\delta^* = \frac{R_{\text{ЖРМ}}}{1440P} (\text{Fe}_{\text{ЖРМ}} - 0,777\text{FeO}_{\text{ЖРМ}}). \quad (8.9)$$

При расчете степени использования восстановительного потенциала водорода необходимо предварительно определить долю водяного пара в колошниковом газе. Расчет основан на балансе водорода: количество водорода и паров воды, покидающих печь с колошниковым газом, равно количеству водорода, поступающего в печь с дутьем и углеводородными добавками.

$$V_{\text{КГ}} \frac{\text{H}_2^{\text{КГ}}}{100} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{КГ}} = V_{\text{Д}} f_{\text{Д}} + (\text{H}_2)_{\text{ПГ}} V_{\text{ПГ}} + (\text{H}_2)_{\text{ПУТ}} G_{\text{ПУТ}}. \quad (8.10)$$

Таким образом, выражение для расчета η_{H_2} по технологической информации о процессе примет вид:

$$\eta_{\text{H}_2} = 1 - \frac{V_{\text{КГ}} \frac{\text{H}_2^{\text{КГ}}}{100}}{V_{\text{Д}} f_{\text{Д}} + (\text{H}_2)_{\text{ПГ}} V_{\text{ПГ}} + (\text{H}_2)_{\text{ПУТ}} G_{\text{ПУТ}}}. \quad (8.11)$$

Для оценки эффективности восстановительных процессов, полученные значения степеней использования восстановительных газов целесообразно сопоставить с равновесными концентрациями восстановительных газов, которые можно рассчитать для конкретных условий работы доменных печей по уравнениям приведенных в работе [9].

В соответствии с определением индекса косвенного восстановления – отношение количества кислорода, отнятого от оксидов железа косвенным путем (с образованием CO_2 и H_2O) к общему количеству кислорода, связанному в оксидах железа, расчетная формула имеет вид:

$$R_i = \frac{V_{\text{КГ}} \frac{(\text{CO}_2^{\text{КГ}} + \text{H}_2^{\text{КГ}})}{100}}{2P\delta}. \quad (8.12)$$

Здесь δ – удельное количество кислорода, связанного в оксидах железа, $\text{м}^3/\text{т}$:

$$\delta = \frac{3R_{\text{ЖРМ}}}{1440P} (\text{Fe}_{\text{ЖРМ}} - 0,259\text{FeO}_{\text{ЖРМ}}). \quad (8.13)$$

Вводя в формулу (8.12) показатели, характеризующие степень использования восстановительного потенциала газового потока, получим

уравнение для расчета индекса косвенного восстановления по технологическим данным

$$R_i = \frac{V_C^\Sigma \eta_{CO} + V_{H_2}^\Sigma \eta_{H_2}}{2P\delta} = \frac{V_C^\Sigma \left(\eta_{CO}^{FeO} + \frac{2\delta^* P}{V_C^\Sigma} \right)}{2P\delta} = \frac{V_C^\Sigma \eta_{CO}^{FeO}}{2P\delta} + \frac{V_{H_2}^\Sigma \eta_{H_2}}{2P\delta} + \frac{\delta^*}{\delta}. \quad (8.14)$$

Способ расчета степени прямого восстановления оксидов железа основан на решении балансового уравнения: общее количество углерода, покидающего печь с колошниковыми газами, образуется в результате горения углерода за счет кислорода дутья и водяных паров, а также за счет газификации углерода по реакциям прямого восстановления железа и примесей:

$$V_{КГ} \frac{(CO_2^{КГ} + CO^{КГ})}{100} = V_D(2\omega_D + f_D) + 4[Fe]r_d P + C_{ПВ}^{эл} P. \quad (8.15)$$

С учетом баланса углерода

$$V_{КГ} \frac{(CO_2^{КГ} + CO^{КГ})}{100} = 1,867 g_K P + (C)_{ПГ} V_{ПГ} + (C)_{ПУТ} G_{ПУТ}, \quad (8.16)$$

решение уравнения (8.15) относительно степени прямого восстановления железа будут иметь следующий вид:

$$r_d = \frac{1,867 g_K P + (C)_{ПГ} V_{ПГ} + (C)_{ПУТ} G_{ПУТ} - V_D(2\omega_D + f_D) - C_{ПВ}^{эл} P}{4[Fe]P}. \quad (8.17)$$

Подход к расчету используемых в вышеприведенных формулах показателей процесса, изложен в разделе 3.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Технологические данные о работе доменных печей

Наименование	Ед. изм.	Доменная печь					
		1	2	3	4	5	6
Полезный объем печи	м ³	2014	1370	2200	2200	3200	4291
Полезная высота печи	м	29,4	26,8	27,898	26,950	33,05	31,432
Диаметр горна	м	9,75	8,4	9,8	9,7	12	13,1
Количество работающих фурм	шт	25	20	22	22	32	36
Диаметр фурм	мм	140	140	140	140	140	140
Высов фурм	м	0,45	0,45	0,4	0,4	0,29	0,29
Расход дутья	м ³ /мин	4093	2943	4536,2	4464	5457,4	6976
Давление дутья	ати	2,86	1,29	3,69	3,5	3,48	4,07
Температура дутья		968	1179	1192	1167	1108	1221
Влажность дутья	г/м ³	3,45	4,6	9,67	3,5	4,88	2,81
Содержание кислорода в дутье	%	28,6	24,9	29,9	31,4	28,09	28,4
Расход природного газа	м ³ /час	26660	11160	25256	28104	20757	54683
Расход пылеугольного топлива	т/час	-	-	29,9	18,8	43,9	-
Суточный расход железорудных материалов	т/сутки	8023	6330	11587	11241	11843	18053
Рудная нагрузка	т/т	4,1	3,8	5,15	4,54	5,42	4,08
Массовая доля окатышей	%	46,4	28,5	52,1	62,3		34,4
Содержание железа в ЖРМ	%	58,26	58,9	57,1	57,3	56,66	57,91
Удельный расход кокса	кг/т	412,2	466,3	315,3	375,99	306,5	400,1
Суточное производство	т/сут	4757	3572	7125	6703	7240	11021
[C]	%	4,67	4,64	4,76	4,77	4,80	4,7
[Mn]	%	0,21	0,16	0,36	0,39	0,26	0,32
[Si]	%	0,69	0,54	0,09	0,10	0,45	0,48
[S]	%	0,016	0,016	0,02	0,03	0,02	0,03
Выход шлака	кг/т	315	309	344	344	322	294
(CaO)	%	39,7	40,66	33,39	33,13	41,3	40,70
(SiO ₂)	%	38,98	37,31	27,87	28,1	40,0	39,36
(Al ₂ O ₃)	%	10,12	10,8	14,97	15,09	7,26	7,04
(MgO)	%	7,79	7,86	13,61	13,79	9,73	9,93
(S)	%	0,68	0,88	0,65	0,66	0,71	0,69
Давление колошникового газа	ати	1,37	1,29	2,19	2,18	1,86	2,18
Температура колошникового газа	°C	222,4	223	119	107	165,4	121
CO	%	23,66	23,5	23,4	22,20	23,97	24,44
CO ₂	%	18,5	20,50	24,8	22,70	21,75	21,42
H ₂ O	%	8,7	6,0	5,4	2,18	7,18	8,33
Степень прямого восстановления	доли единиц	0,28	0,38	0,31	0,42	0,24	0,20

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы теории и технологии доменной плавки / А.Н. Дмитриев, Н.С. Шумаков, Л.И. Леонтьев, О.П. Онорин – Рос. акад. наук, Урал, отд-ние, Ин-т металлургии. –Екатеринбург : УрО РАН, 2005. – 545 с.
2. Металлургия чугуна : учебник для студентов вузов / Е.Ф. Вегман, Б.Н. Жеребин, А.Н. Похвиснев [и др.] ; под ред. Ю.С. Юсфина – 3-е изд., перераб. и доп. – М : Академкнига, 2004 . – 774 с.
3. Товаровский, И.Г. Эволюция доменной плавки / И.Г. Товаровский, В.П. Лялюк – Днепропетровск: ПОРОГИ, 2001. – 424 с.
4. Китаев, Б.И. Теплотехника доменного процесса / Б.И. Китаев, Ю.Г. Ярошенко, Е.Л. Суханов, Ю.Н. Овчинников, В.С. Швыдкий – М. : Металлургия, 1978. – 248 с.
5. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спириин [и др.] ; под ред. Н.А. Спирина – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2001. – 617 с.
6. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / Н.А. Спириин [и др.] : под ред. Н.А. Спирина – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – 301 с.
7. Товаровский, И.Г. Применение математических методов и ЭВМ для анализа и управления доменным процессом / И.Г. Товаровский, Е.И. Райх, К.К. Шкодин, В.А. Улахович – М. : Металлургия, 1978. – 204 с.
8. Рамм, А.Н. Определение технических показателей доменной плавки. Метод расчета и справочные данные – Л. : изд-во ЛПИ, 1971. – 110 с.
9. Доменное производство: Справочное издание. Т.1 Подготовка руд и доменный процесс / Под ред. Е.Ф. Вегмана – М. : Металлургия, 1989. – 496 с.
10. Восстановление, теплообмен и гидродинамика в доменном процессе / Под ред. С.В. Шаврина // Труды института металлургии УФАН СССР. Часть 1, вып. 24. 1970. – 130 с, Часть 2, вып. 26, 1972. – 140 с.
11. Гилева, Л. Ю. Разработка математической модели с переменной структурой для анализа и прогноза показателей работы доменной печи на основе

- отчетных данных / Л.Ю. Гилева, Ю.Г. Ярошенко, С.А. Загайнов, Е.Л. Суханов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – №4. – С. 51-55.
12. Суханов, Е.Л. Определение методом моделирования показателей доменного процесса при изменении условий плавки / Е.Л. Суханов, С. А. Загайнов. Ю.О. Раев // Изв. вузов. Черная металлургия, – 1989. – №8. – С. 129-133.
13. Гилева, Л.Ю. Анализ нелинейности характеристик доменного процесса / Л.Ю. Гилева, С.А. Загайнов, Ю.Г. Ярошенко, О.П. Онорин, Е.Л.Суханов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1994. – №8. – С.66-68.
14. Исследование порозности многокомпонентных доменных шихт / В.Н. Ковшов, А.И. Галаганов, В.Т. Чистяков и др. // Металлургия и коксохимия – К., 1977. – Вып. 53. – С.34-37.
15. Гиммельфарб, А.А. Процессы восстановления и шлакообразования в доменных печах / А.А. Гиммельфарб, К.И. Котов – М.: Металлургия, 1982. – 328 с.
16. Кацман, В.Х. Исследование влияния процессов восстановления и науглероживания на температурный интервал плавления железорудных материалов / В.Х. Кацман, В.А. Емельянов, В.Н. Никифоров // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1983. – № 1. – С. 3-4.
17. Кацман, В.Х. Методика оценки высокотемпературных свойств железорудных материалов / В.Х. Кацман, В.И. Шатоха, В.А. Емельянов // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1985. – № 11. – С. 131-132.
18. Колесанов Ф.Ф. Движение газов через слой кусковых материалов // М.: Металлургиздат, 1956. – 88 с.
19. Готлиб А. Д. Доменный процесс. – М.: Металлургия, 1966. –503 с.

Электронный образовательный текстовый ресурс

Лариса Юрьевна Гилёва

Сергей Александрович Загайнов

ТЕХНОЛОГИЯ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ. РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА

Учебно-методические материалы по дисциплинам
«Теория и технология доменной плавки», «Методы анализа и прогноза
технологических режимов доменной плавки» для студентов всех форм
обучения направления подготовки «Металлургия» (22.03.02, 22.04.02)

Подготовка к публикации

Л.Ю. Гилева

Компьютерный набор

Л.Ю. Гилева

Рекомендовано Методическим советом УрФУ

Разрешено к публикации _____

Электронный формат – pdf

Объем 1,57 уч.-изд. л.

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Информационный портал УрФУ

www.study.urfu.ru