

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Технология конструкционных материалов»

Практикум по дисциплине

«Экстракция чёрных металлов из природного и техногенного сырья»

Авторы
Бацемакин М.Ю.

Ростов-на-Дону, 2019

Аннотация

Методические указания предназначены для выполнения практических работ по дисциплине "Экстракция чёрных металлов их природного и техногенного сырья" студентами направления 22.03.02 Metallургия.

Авторы

к.т.н., доцент кафедры «Технология конструкционных материалов» Бацемакин М.Ю.



Оглавление

	стр.
Практическое занятие № 1 "Расчёт истинной плотности окатышей"	5
1.1. Цель работы.....	5
1.2. Общие сведения.....	5
1.3. Порядок и пример выполнения работы.....	7
1.4. Варианты заданий.....	9
1.5. Контрольные вопросы.....	11
1.6. Список литературы.....	12
Практическое занятие № 2 "Расчёт степени однородности шихты различными методами".....	13
2.1. Цель работы.....	13
2.2. Общие сведения.....	13
2.3. Порядок и пример выполнения работы.....	15
2.4. Варианты заданий.....	16
2.5. Контрольные вопросы.....	20
2.6. Список литературы.....	20
Практическое занятие № 3 "Расчёт ожидаемого химического состава обожжённых окатышей по заданному составу шихтовых компонентов".....	21
3.1. Цель работы.....	21
3.2. Общие сведения.....	21
3.3. Порядок и пример выполнения работы.....	24
3.4. Варианты заданий.....	33
3.5. Контрольные вопросы.....	38
3.6. Список литературы.....	38

Практическая работа № 4 "Расчёт материального баланса ДСП-150, работающей по технологии переплавки окатышей в ванне"..... 40

4.1.	Цель работы.....	40
4.2.	Общие сведения.....	40
4.3.	Порядок и пример выполнения работы.....	48
4.4.	Варианты заданий.....	62
4.5.	Контрольные вопросы.....	64
4.6.	Список литературы.....	65

Практическая работа № 5 "Расчёт химического состава железа прямого восстановления (DRI)"..... 66

5.1.	Цель работы.....	66
5.2.	Общие сведения.....	66
5.3.	Порядок и пример выполнения работы.....	69
5.4.	Варианты заданий.....	75
5.5.	Контрольные вопросы.....	77
5.6.	Список литературы.....	77

Практическая работа № 6 "Расчёт состава горнового газа"..... 78

6.1.	Цель работы.....	78
6.2.	Общие сведения.....	78
6.3.	Порядок и пример выполнения работы.....	83
6.4.	Варианты заданий.....	85
6.5.	Контрольные вопросы.....	86
6.6.	Список литературы.....	86

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

"РАСЧЁТ ИСТИННОЙ ПЛОТНОСТИ ОКАТЫШЕЙ"

1.1. Цель работы

Цель работы — научить студентов проводить расчёт истинной плотности окатышей.

1.2. Общие сведения

Интенсификация процессов обжига окатышей возможна следующими способами:

- 1) увеличение количества теплоносителя, просасываемого через слой обрабатываемого материала;
- 2) увеличение температуры теплоносителя в отапливаемых зонах обжиговой машины до максимально возможного уровня по техническим условиям;
- 3) использование комбинированного сжигания газообразного топлива (над слоем и в слое обрабатываемых окатышей);
- 4) оптимизация высоты слоя и диаметра обрабатываемых окатышей;
- 5) введение в слой внутреннего источника тепла (твёрдого топлива).

Анализ данных способов интенсификации технологического процесса показывает, что все они основаны на газодинамических процессах в слое дисперсного материала.

К газодинамическим характеристикам слоя окатышей на обжиговой машине относятся: средний диаметр окатышей d , их насыпная масса ρ_n , высота слоя H , порозность слоя E , коэффициент сопротивления слоя ζ . Отдельным пунктом можно выделить усадку слоя, влияние которого на газодинамику слоя проявляется после сушки 1. Большая часть из перечисленных характеристик связаны между собой. Так, сопротивления слоя ΔP связано с коэффициентом сопротивления ζ через уравнение Дарси-Вейсбаха:

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{H}{d} \cdot \frac{U_0^2}{2g} \cdot \rho_r \cdot \frac{T_0}{T}, \text{ Па}, \quad (1.1)$$

где ρ_r — плотность фильтруемого газа, кг/м³;

U_0 — скорость фильтрации на свободное сечение слоя, м/с;

T — температура газа, °К;

$T_0 = 273$ °К.

Величина порозности слоя E связана с насыпной массой $\rho_{\text{нас}}$ уравнением:

$$E = 1 - \frac{\rho_H}{\rho_{\text{ист}} \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (1.2)$$

где $\rho_{\text{ист}}$ — истинная плотность твёрдой фазы окатышей, кг/м³;

ε — пористость исходных окатышей, доли.

Плотность твёрдой фазы $\rho_{\text{ист}}$ приближается к истинной плотности беспористой структуры материала, т.е. к плотности отдельных зёрен, составляющих твёрдую фазу окатыша, и рассчитывается по формуле:

$$\rho_{\text{ист}} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \rho_i \quad (1.3)$$

где m_i — фазовые составляющие доли;

ρ_i — плотность фазы, кг/м³;

n — количество фаз.

В таблице 1.1 приведены плотности основных фаз (веществ), сопутствующих железорудным материалам. Таким образом, зная полный химический состав материала, а также в каких соединениях находятся отдельные химические компоненты, можно расчётным путём определить истинную плотность материала с допустимой долей погрешности. Чем полнее химический состав материала, тем точнее расчёт истинной плотности.

Таблица 1.1

Истинные плотности некоторых оксидов

Химическая формула	FeO	Fe ₂ O ₃	Fe ₃ O ₄	FeCO ₃	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	V ₂ O ₅
$\rho_{\text{ист}}, \text{кг/м}^3 \cdot 10^3$	5,70	5,25	5,18	3,80	3,40	3,60	2,30	3,70	4,25	3,36

Насыпная плотность окатышей зависит от величины распределения окатышей по размерам. Для более однородного гранулометрического состава характерна меньшая насыпная плотность, с увеличением вариации окатышей по размерам насыпная плотность окатышей возрастает. Экспериментальные замеры $\rho_{нас}$ показали, что насыпная плотность сырых окатышей изменяется в диапазоне 2,25...2,35, среднее значение — около 2,3 т/м³. Отсюда порозность слоя сырых окатышей (при пористости $\varepsilon \approx 0,32$ и истинной плотности 5,08 кг/м³) равна:

$$E = 1 - \frac{2,3}{5,08 \cdot (1 - 0,32)} = 0,33. \quad (1.4)$$

Связь между ζ , — коэффициентом сопротивления слоя и его порозностью — E вполне удовлетворительно описывается уравнением:

$$\zeta = \frac{24}{E^{1,75}}, \quad (1.5)$$

$$\zeta = \frac{24}{0,33^{1,75}} = 167,037.$$

1.3. Порядок и пример выполнения работы

Необходимо определить истинную плотность окатышей. Химический состав обожжённых окатышей представлен в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Химический состав обожжённых окатышей

Содержание компонента, %						
Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
66,1	1,2	4,7	0,55	0,62	0,35	0,28

Известно, что в процессе обжига магнетит окисляется до гематита, содержание монооксида железа свидетельствует об

остаточном количестве магнетита. Для расчёта количества кислорода, находящегося в материале, необходимо определить, в каком количестве содержатся в окатышах гематит и магнетит. Так как магнетит определяется как соединение $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, то достаточно рассчитать количество железа, находящегося в FeO , а остальное количество $\text{Fe}_{\text{общ}}$ будет находиться в гематитовой фазе — Fe_2O_3 .

Определяем процентное содержание двухвалентного железа:

$$X_{\text{Fe}^{2+}} = X_{\text{FeO}} \cdot \frac{56}{72};$$
$$X_{\text{Fe}^{2+}} = 1,2 \cdot \frac{56}{72} = 0,93.$$

Тогда остальное железо будет находиться в форме высшего оксида — Fe^{3+} :

$$\text{Fe}^{3+} = X_{\text{FeO}} - \text{Fe}^{2+} = 66,1 - 0,93 = 65,17\%.$$

Для расчёта истинной плотности необходимо определить количество гематита, что обеспечивается сложением количества трёхвалентного железа с количеством кислорода, находящегося в соединении с ним. При невысоком содержании серы, фосфора и других компонентов (менее 1%) плотностью этих фаз можно пренебречь.

Содержание гематитовой фазы составит:

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = \frac{65,17 \cdot 160}{112} = 93,1\%.$$

Следует проверить сумму всех компонентов, которая должна быть равна 100 %. Если сумма получается меньше 100 %, остаток следует определить и отнести на другие компоненты, неопределяемые химическим анализом. При этом отклонение от 100 % не должно превышать 2 %. Если сумма компонентов превышает 100 % или отклонение от 100 % более 2 %, следует выполнить проверку химического состава шихтовых составляющих и расчёт количества кислорода.

$$\Sigma = 93,1 + 1,2 + 407 + 0,55 + 0,62 + 0,35 = 100,52\%$$

Отклонение от 100 % составило 0,52 % — меньше 2 %, данным отклонением можно пренебречь. Данная погрешность обусловлена допустимыми погрешностями химического анализа. Например, при определении железа общего допустимое отклонение согласно ГОСТ составляет $\pm 0,4$ % при уровне измеряемого железа 50...70 %.

Тогда истинная плотность будет определяться:

$$\rho_{\text{ист}} = \frac{1}{100} \cdot (93,1 \cdot 5,25 + 1,2 \cdot 5,7 + 4,7 \cdot 2,3 + 0,55 \cdot 3,7 + 0,62 \cdot 3,4 + 0,35 \cdot 3,6) = 5,12 \frac{\text{кг}}{\text{дм}^3}$$

1.4. Варианты заданий

Вариант 1

Необходимо определить истинную плотность окатышей. Химический состав обожжённых окатышей представлен в таблице.

Содержание компонента, %						
Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
69,1	1,5	4,3	0,45	0,52	0,30	0,38

Вариант 2

Необходимо определить истинную плотность окатышей. Химический состав обожжённых окатышей представлен в таблице.

Содержание компонента, %						
Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
71,1	1,8	5,3	0,65	0,42	0,28	0,33

Вариант 3

Необходимо определить истинную плотность окатышей. Химический состав обожжённых окатышей представлен в таблице.

Содержание компонента, %						
Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
63,1	1,9	4,5	0,55	0,42	0,27	0,26

Вариант 4

Необходимо определить истинную плотность окатышей. Химический состав обожжённых окатышей представлен в таблице.

Содержание компонента, %						
Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
64,1	1,6	4,8	0,47	0,55	0,26	0,27

Вариант 5

Необходимо определить истинную плотность окатышей. Химический состав обожжённых окатышей представлен в таблице.

Содержание компонента, %						
Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
69,1	1,5	4,3	0,45	0,52	0,30	0,34

Вариант 6

Необходимо определить истинную плотность окатышей. Химический состав обожжённых окатышей представлен в таблице.

Содержание компонента, %						
Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
64,7	1,9	4,5	0,43	0,54	0,31	0,28

Вариант 7

Необходимо определить истинную плотность окатышей. Химический состав обожжённых окатышей представлен в таблице.

Содержание компонента, %						
Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
63,4	1,4	3,9	0,51	0,42	0,33	0,31

Вариант 8

Необходимо определить истинную плотность окатышей. Химический состав обожжённых окатышей представлен в таблице.

Содержание компонента, %						
Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
67,1	1,6	4,4	0,48	0,57	0,27	0,27

Вариант 9

Необходимо определить истинную плотность окатышей. Химический состав обожжённых окатышей представлен в таблице.

Содержание компонента, %						
Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
65,1	2,1	5,1	0,52	0,42	0,25	0,36

Вариант 10

Необходимо определить истинную плотность окатышей. Химический состав обожжённых окатышей представлен в таблице.

Содержание компонента, %						
Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ППП
68,1	2,2	4,4	0,41	0,55	0,25	0,35

1.5. Контрольные вопросы

1. Какими способами возможна интенсификация процессов обжига окатышей?
2. На чём основаны способы интенсификации технологического процесса обжига окатышей?
3. Что относится к газодинамическим характеристикам слоя окатышей?
4. Расчёт истинной плотности окатышей точнее при каких условиях?
5. Какую газодинамическую характеристику можно выделить отдельным пунктом?
6. От какой величины зависит насыпная плотность окатышей?
7. Какая насыпная плотность необходима для более однородного гранулометрического состава?
8. Из-за чего насыпная плотность окатышей возрастает?
9. В каких диапазонах, изменяется насыпная плотность сырых окатышей?
10. По какой формуле рассчитывается порозность слоя сырых окатышей (если пористость $\varepsilon \approx 0,32$, а истинная плотность $5,08 \text{ кг/м}^3$)?

1.6. Список литературы

1. Юсфин, Ю. С. Металлургия железа [Текст]: учебник для вузов / Ю. С. Юсфин, Н. Ф. Пашков. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. – 464 с.
2. Шилаев, В. П. Основы обогащения полезных ископаемых [Текст]: учебное пособие / В. П. Шилаев. – М.: Недра, 1986. – 296 с
3. Тимофеева, А. С. Экстракция чёрных металлов из природного и техногенного сырья [Текст] / А. С. Тимофеева, Т. В. Никитченко, Е. С, Тимофеева. – Старый Оскол: ООО "ТНТ", 2017. – 303 с.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

"РАСЧЁТ СТЕПЕНИ ОДНОРОДНОСТИ ШИХТЫ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ"

2.1. Цель работы

Цель работы — научить студентов проводить расчёт степени однородности шихты различными методами.

2.2. Общие сведения

Основная задача технологической операции составления шихты заключается в правильном и точном её дозировании. Правильность дозирования обеспечивается расчётом всех составляющих шихты, а точность дозирования — работой основного технологического оборудования. Химический состав шихты может быть определён по химическим составам его составляющих компонентов и долям компонентов шихты, т.е. как средневзвешенное значение:

$$C_{\text{ш}} = \frac{C_1 \cdot m_1 + C_2 m_2 + \dots + C_n \cdot m_n}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (2.1)$$

где C_i — доля химического элемента в одном из компонентов шихты, ед. или %;

m_i — масса компонента шихты, кг или т.

Для производства железорудных окатышей обычно используется три компонента: железорудный концентрат, связующей компонент — бентонит, флюсоупрочняющая добавка — флюс.

Технологическая операция смешивания шихты является одной из наиболее важных при производстве окатышей. Только при однородной шихте возможно осуществить стабильный ход процесса окомкования и получить сырые окатыши равномерной плотности и крупности, а также достичь высокого качества обожжённых окатышей.

Шихта представляет собой смесь неоднородных по гранулометрическому, минералогическому и химическому составам частичек. Даже при тщательном перемешивании в объёме шихтовой

смеси наблюдаются участки с различными свойствами.

Показателем однородности шихты может являться величина среднеквадратичного отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_{\text{ср}})^2}{n - 1}}, \quad (2.2)$$

где C_i — содержание компонента (элемента) в разовой пробе, %;
 $C_{\text{ср}}$ — среднеарифметическое содержание компонента (элемента) во всех отобранных пробах, %;
 n — число проб.

$$C_{\text{ср}} = \frac{\sum C_i}{n}. \quad (2.3)$$

Для оценки степени однородности шихты В. И. Коротич и Г. И. Каморник предложили более простой показатель — среднее абсолютное отклонение:

$$\Delta C = \frac{\sum_{i=1}^n |C_i - C_{\text{ср}}|}{n}. \quad (2.4)$$

Среднее абсолютное отклонение представляет собой наиболее вероятное максимальное отклонение от среднего содержания данного компонента в шихте (в числителе суммируются все разности содержаний компонента без учёта знаков). Общая амплитуда колебаний составляет $2\Delta C$.

Степень однородности шихты можно оценивать также коэффициентом однородности, представляющим собой отношение среднего минимального значения содержания компонента в смеси к среднему максимальному:

$$K_0 = \frac{C_{\text{ср}} - \Delta C}{C_{\text{ср}} + \Delta C}. \quad (2.5)$$

Величина K_0 колеблется от 0 до 100 %, или от 0 до 1. При идеальном качестве смешивания K_0 равен 100 %, или 1.

2.3. Порядок и пример выполнения работы

Расчёт степени однородности шихты различными методами и их сравнительный анализ.

После смесительного барабана были отобраны 10 проб шихты — смесь концентрата с бентонитом. Бентонит характеризуется наиболее высоким содержанием диоксида кремния, поэтому при смешивании концентрата с бентонитом наиболее объективным показателем процесса перемешивания будет показатель содержания SiO_2 в шихте. Результаты определений представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	67,50	67,47	67,52	67,54	67,48	67,51	67,52	67,5	67,48	67,47
SiO_2	4,57	4,50	4,52	4,61	4,51	4,53	4,5	4,61	4,54	4,53

Расчёт среднего содержания SiO_2 в шихте.

Среднее содержание компонента в шихте — SiO_2 определяется по формуле:

$$C_{\text{ср}} = \frac{\sum c_i}{n} = \frac{45,42}{10} = 4,542$$

Среднеквадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{0,01536}{9}} = 0,0413 = 4,13\%$$

Среднее абсолютное отклонение:

$$\Delta C = \frac{0,328}{10} = 0,328\%$$

Коэффициент однородности шихты:

$$K_0 = \frac{4,542 - 0,0328}{4,542 + 0,0328} = \frac{4,5092}{4,5748} = 0,98566.$$

$$K_0 = 98,57\%$$

2.4. Варианты заданий

Вариант 1

Определить степень однородности шихты различными методами и сделать их сравнительный анализ.

После роторного смесителя были отобраны 10 проб шихты — смесь концентрата с бентонитом. Бентонит характеризуется наиболее высоким содержанием диоксида кремния, поэтому при смешивании концентрата с бентонитом наиболее объективным показателем процесса перемешивания будет показатель содержания SiO_2 в шихте. Результаты определений представлены в таблице.

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	64,50	64,47	64,52	64,54	64,48	64,51	64,52	64,5	64,48	64,47
SiO_2	5,5	5,45	5,62	5,61	5,74	5,63	5,35	5,75	5,44	5,53

Вариант 2

Расчёт степени однородности шихты различными методами и их сравнительный анализ.

После смесительного барабана были отобраны 10 проб шихты — смесь концентрата с бентонитом. Бентонит характеризуется наиболее высоким содержанием диоксида кремния, поэтому при смешивании концентрата с бентонитом наиболее объективным показателем процесса перемешивания будет показатель содержания SiO_2 в шихте. Результаты определений представлены в таблице.

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	66,50	66,47	66,52	66,54	66,48	66,51	66,52	66,5	66,48	66,47
SiO_2	5,57	5,50	5,52	5,61	5,51	5,53	5,5	5,61	5,54	5,53

Вариант 3

Расчёт степени однородности шихты различными методами и их сравнительный анализ.

После смесительного барабана были отобраны 10 проб шихты — смесь концентрата с бентонитом. Бентонит характеризуется наиболее высоким содержанием диоксида кремния, поэтому при смешивании концентрата с бентонитом наиболее объективным показателем процесса перемешивания будет показатель содержания SiO_2 в шихте. Результаты определений представлены в таблице.

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	68,50	68,47	68,52	68,54	68,48	68,51	68,52	68,5	68,48	68,47
SiO_2	3,57	3,50	3,52	3,61	3,51	3,53	3,5	3,61	3,54	3,53

Вариант 4

Расчёт степени однородности шихты различными методами и их сравнительный анализ.

После смесительного барабана были отобраны 10 проб шихты — смесь концентрата с бентонитом. Бентонит характеризуется наиболее высоким содержанием диоксида кремния, поэтому при смешивании концентрата с бентонитом наиболее объективным показателем процесса перемешивания будет показатель содержания SiO_2 в шихте. Результаты определений представлены в таблице.

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	65,50	65,47	65,52	65,54	65,48	65,51	65,52	65,5	65,48	65,47
SiO_2	5,57	5,50	5,52	5,61	5,51	5,53	5,5	5,61	5,54	5,53

Вариант 5

Расчёт степени однородности шихты различными методами и их сравнительный анализ.

После смесительного барабана были отобраны 10 проб шихты — смесь концентрата с бентонитом. Бентонит характеризуется наиболее высоким содержанием диоксида кремния, поэтому при смешивании концентрата с бентонитом наиболее объективным показателем процесса перемешивания будет показатель содержания SiO_2 в шихте. Результаты определений представлены в таблице.

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	69,50	69,47	69,52	69,54	69,48	69,51	69,52	69,5	69,48	69,47

SiO ₂	3,57	3,50	3,52	3,61	3,51	3,53	3,5	3,61	3,54	3,53
------------------	------	------	------	------	------	------	-----	------	------	------

Вариант 6

Расчёт степени однородности шихты различными методами и их сравнительный анализ.

После смесительного барабана были отобраны 10 проб шихты — смесь концентрата с бентонитом. Бентонит характеризуется наиболее высоким содержанием диоксида кремния, поэтому при смешивании концентрата с бентонитом наиболее объективным показателем процесса перемешивания будет показатель содержания SiO₂ в шихте. Результаты определений представлены в таблице.

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fe _{общ}	70,50	67,47	70,52	70,54	70,48	70,51	70,52	70,5	70,48	70,47
SiO ₂	3,57	3,50	3,52	3,61	3,51	3,53	3,5	3,61	3,54	3,53

Вариант 7

Расчёт степени однородности шихты различными методами и их сравнительный анализ.

После смесительного барабана были отобраны 10 проб шихты — смесь концентрата с бентонитом. Бентонит характеризуется наиболее высоким содержанием диоксида кремния, поэтому при смешивании концентрата с бентонитом наиболее объективным показателем процесса перемешивания будет показатель содержания SiO₂ в шихте. Результаты определений представлены в таблице.

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fe _{общ}	71,50	71,47	71,52	71,54	71,48	71,51	71,52	71,5	71,48	71,47
SiO ₂	5,57	5,50	5,52	5,61	5,51	5,53	5,5	5,61	5,54	5,53

Вариант 8

Расчёт степени однородности шихты различными методами и их сравнительный анализ.

После смесительного барабана были отобраны 10 проб шихты — смесь концентрата с бентонитом. Бентонит характеризуется

наиболее высоким содержанием диоксида кремния, поэтому при смешивании концентрата с бентонитом наиболее объективным показателем процесса перемешивания будет показатель содержания SiO_2 в шихте. Результаты определений представлены в таблице.

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	72,50	72,47	72,52	72,54	72,48	72,51	72,52	72,5	72,48	72,47
SiO_2	3,57	3,50	3,52	3,61	3,51	3,53	3,5	3,61	3,54	3,53

Вариант 9

Расчёт степени однородности шихты различными методами и их сравнительный анализ.

После смесительного барабана были отобраны 10 проб шихты — смесь концентрата с бентонитом. Бентонит характеризуется наиболее высоким содержанием диоксида кремния, поэтому при смешивании концентрата с бентонитом наиболее объективным показателем процесса перемешивания будет показатель содержания SiO_2 в шихте. Результаты определений представлены в таблице.

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	63,50	63,47	63,52	63,54	63,48	63,51	63,52	63,5	63,48	63,47
SiO_2	5,57	5,50	5,52	5,61	5,51	5,53	5,5	5,61	5,54	5,53

Вариант 10

Расчёт степени однородности шихты различными методами и их сравнительный анализ.

После смесительного барабана были отобраны 10 проб шихты — смесь концентрата с бентонитом. Бентонит характеризуется наиболее высоким содержанием диоксида кремния, поэтому при смешивании концентрата с бентонитом наиболее объективным показателем процесса перемешивания будет показатель содержания SiO_2 в шихте. Результаты определений представлены в таблице.

№ пробы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\text{Fe}_{\text{общ}}$	62,50	62,47	62,52	62,54	62,48	62,51	62,52	62,5	62,48	62,47
SiO_2	5,57	5,50	5,52	5,61	5,51	5,53	5,5	5,61	5,54	5,53



2.5. Контрольные вопросы

1. В чём заключается основная задача технологической операции составления шихты?
2. Как обеспечивается правильность дозирования шихты?
3. Как достигается точность дозирования?
4. Какие компоненты используются для производства железорудных окатышей?
5. При какой шихте можно осуществить стабильный ход процесса окомкования?
6. Что представляет собой шихта?
7. Какая величина является показателем однородности шихты?
8. Какой показатель предложили для оценки степени однородности шихты В. И. Коротич и Г. И. Каморник?
9. Как можно оценивать степень однородности шихты?
10. Чему равен коэффициент однородности шихты при идеальном смешивании?

2.6. Список литературы

1. Юсфин, Ю. С. Металлургия железа [Текст]: учебник для вузов / Ю. С. Юсфин, Н. Ф. Пашков. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. – 464 с.
2. Шилаев, В. П. Основы обогащения полезных ископаемых [Текст]: учебное пособие / В. П. Шилаев. – М.: Недра, 1986. – 296 с.
3. Тимофеева, А. С. Экстракция чёрных металлов из природного и техногенного сырья [Текст] / А. С. Тимофеева, Т. В. Никитченко, Е. С. Тимофеева. – Старый Оскол: ООО "ТНТ", 2017. – 303 с.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

"РАСЧЁТ ОЖИДАЕМОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОБОЖЁННЫХ ОКАТЫШЕЙ ПО ЗАДАННОМУ СОСТАВУ ШИХТОВЫХ КОМПОНЕНТОВ"

3.1. Цель работы

Цель работы. Научить студентов делать расчёт ожидаемого химического состава обожжённых окатышей по заданному составу шихтовых компонентов.

3.2. Общие сведения

В ходе технологического процесса производства окатышей дозировка бентонита и флюса, как правило, производится по весу влажного концентрата, т.е. следует задаться массой концентрата, после чего рассчитывать массу дозируемого бентонита и флюса. Наиболее удобно расчёт вести на 100 т. или кг. концентрата.

Следует учитывать, что химический состав материала определяется при его нулевой влажности. Для применения закона сохранения масс следует определить массы каждого химического компонента, входящего в состав составляющих шихты.

Масса бентонитового порошка и флюса, приходящего в состав шихты определяем по заданным дозировкам шихтовых компонентов.

Сухие массы составляющих шихты определяются по заданным долям влажности по формуле:

$$m_k^{\text{сух}} = m_k \cdot \left(1 - \frac{W_k}{100}\right), \text{ кг} \quad (3.1)$$

$$m_b^{\text{сух}} = m_b \cdot \left(1 - \frac{W_b}{100}\right), \text{ кг} \quad (3.2)$$

$$m_\phi^{\text{сух}} = m_\phi \cdot \left(1 - \frac{W_\phi}{100}\right), \text{ кг.} \quad (3.3)$$

где – W_k , W_b , W_ϕ – массовая доля влаги в концентрате, связующей (бентоните) и флюсоупрочняющей добавках, %.

Содержание двухвалентного железа определяется по содержанию монооксида железа (FeO) в концентрате и флюсе по формуле:

$$X_{\text{Fe}^{2+}} = X_{\text{FeO}} \cdot \frac{56}{72}, \text{ кг.} \quad (3.4)$$

Остальное железо будет находиться в форме высшего оксида – Fe^{3+} :

$$X_{\text{Fe}^{3+}} = X_{\text{Fe}_{\text{общ}}} - X_{\text{Fe}^{2+}}, \text{ \%}. \quad (3.5)$$

Содержание кислорода в составе соединений железа будет определяться.

$$X_{\text{O}_2} = X_{\text{Fe}^{2+}} \cdot \frac{16}{56} + X_{\text{Fe}^{3+}} \cdot \frac{48}{112}, \text{ кг.} \quad (3.6)$$

Количество диоксида углерода (CO_2), входящего в состав CaO известняка (CaCO_3), находящегося во флюсе будет определяться как:

$$X_{\text{CO}_2} = X_{\text{CaO}} \cdot \frac{44}{56}, \text{ \%}. \quad (3.7)$$

Содержание CO_2 определяется только для известняка (флюса), так как в других компонентах шихты оксид кальция находится в других соединениях.

Сумма всех химических компонентов для концентрата, бентонита, флюса должна составлять $100 \% \pm 0,5 \%$.

Сухую массу каждого химического компонента, входящего в состав шихты находим из уравнения:

$$m_x = \frac{X}{100} \cdot m^{\text{сух}}. \quad (3.8)$$

Для определения массы шихты по сухому весу и её элементарного состава, массы каждого компонента входящего в состав шихты, складываем между собой и тогда мы можем определить массу шихты.

$$m_x^{\text{ш}} = m_x^{\text{к}} + m_x^{\text{б}} + m_x^{\text{ф}}. \quad (3.9)$$

где - $m_x^{\text{к}}$, $m_x^{\text{б}}$, $m_x^{\text{ф}}$ - масса концентрата по сухому весу, масса связующей и флюсоупрочняющей добавках, по сухому весу, кг.

Чтобы определить массу кислорода, поступающего в окатыши в процессе обжига, необходимо знать, какая часть двухвалентного железа окислится. Для этого задаёмся остаточным содержанием FeO в окатышах по окончании обжига. Например, в соответствии с требованиями стандарта организации или технических условий на окатыши остаточное содержание FeO должно составлять не более 0,5 %.

$$m_{\text{FeO}}^{\text{ост}} = \frac{m^{\text{ш}} \cdot (X_{\text{Fe}}^{\text{ост}} - \Delta_{\text{FeO}})}{100}. \quad (3.10)$$

где $m^{\text{ш}}$ – масса шихты по сухому весу, кг;

$X_{\text{FeO}}^{\text{ост}}$ – остаточное содержание FeO в обожжённых окатышах, %;

Δ_{FeO} – допустимая погрешность химического анализа, %.

Остаточное количество серы задаётся в весовом измерении исходя из требований технических условий или минимизации содержания данного компонента в обожжённых окатышах, так как сера является вредным компонентом для последующих металлургических переделов – металлизации и доменного производства.

Увеличение массы шихты за счёт присоединённого кислорода – окисления магнетита найдём из уравнения:

$$M_{\text{O}_2}^{\text{окисл}} = \left(m_{\text{Fe}^{2+}}^{\text{ш}} - m_{\text{FeO}}^{\text{ост}} \cdot \frac{56}{72} \right) \cdot \frac{16}{112}, \text{ кг} \quad (3.11)$$

Для определения потерь массы шихты за счёт разложения известняка, выгорания серы и потерь при прокаливании воспользуемся уравнением:

$$M_{\text{потерь}} = m_{\text{CO}_2} + m_{\text{S}} - m_{\text{S}}^{\text{ост}} + m_{\text{ппп}}, \text{ кг} \quad (3.12)$$

Масса шихты на выходе из обжига находим по уравнению:

$$M_{\text{ш}}^{\text{обож}} = M_{\text{ш}}^{\text{сух}} + M_{\text{O}_2} + M_{\text{потерь}}, \text{ кг} \quad (3.13)$$

Определяем массы компонентов на выходе из обжига и находим процентный состав обожжённой шихты как отношение массы компонента к общей массе обожжённой шихты. Масса железа общего складывается из масс двухвалентного и трёхвалентного железа. Масса кислорода увеличивается на количество присоединённого кислорода. При проверке равенства суммарного состава обожжённой шихты (100 %), следует учитывать, что массы железа и кислорода, содержащиеся в остаточном оксиде железа – FeO, учтены соответственно в массе железа общего и кислорода.

$$M_{\text{Fe}_{\text{общ}}}^{\text{обож}} = m_{\text{Fe}^{2+}} + m_{\text{Fe}^{3+}}; \quad (3.14)$$

$$M_{\text{O}_2}^{\text{обож}} = m_{\text{O}_2} + M_{\text{O}_2}^{\text{окисл}}; \quad (3.15)$$

$$M_x^{\text{обож}} = M_{\text{Fe}_{\text{общ}}}^{\text{обож}} + M_{\text{O}_2}^{\text{обож}} + M_{\text{SiO}_2}^{\text{обож}} + M_{\text{Al}_2\text{O}_3}^{\text{обож}} + M_{\text{CaO}}^{\text{обож}} + M_{\text{MgO}}^{\text{обож}} + M_{\text{S}}^{\text{обож}} + \\ + M_{\text{P}}^{\text{обож}} + M_{\text{K}_2+4\text{Na}_2\text{O}}^{\text{обож}} + M_{\text{TiO}_2}^{\text{обож}}, \%$$

Состав обожжённой шихты – это и есть ожидаемый состав обожжённых окатышей при заданных химических составах материалов, образующих шихту окатышей, и их заданной дозировке.

3.3. Порядок и пример выполнения работы

Рассчитать ожидаемый химический состав обожжённых окатышей, если известно, что дозировка бентонита составила 0,6 %, флюса – 1,0 %. Химические составы концентрата, бентонита и флюса представлены в таблице:

Таблица 3.1
Химические составы концентрата, бентонита и флюса, %

Наименование материала	Содержание химического компонента, %										
	Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O+Na ₂ O	TiO ₂	ППП
Концентрат	68,24	28,84	4,54	0,18	0,22	0,32	0,067	0,012	0,078	0,026	0,28
Бентонит	3,56		52,84	17,42	8,23	3,14	0,78	0,068	3,07		9,37
Флюс	4,02	0,15	2,75	28,53	30,86	0,37	0,081	0,06	0,47	0,71	6,2

Массовая доля влаги в концентрате – 9,9 %, в бентопорошке – 6,8 %, во флюсе – 1,7 %. Остаточное содержание серы в обожжённых окатышах принять равным 0,002 %, а монооксида железа FeO – 0,5 %.

В ходе технологического процесса производства окатышей дозировка бентонита и флюса, как правило, производится по весу влажного концентрата, т.е. следует задаться массой концентрата, после чего рассчитывать массу дозируемого бентонита и флюса. Наиболее удобно расчёт вести на 100 т. или кг. концентрата.

Следует учитывать, что химический состав материала определяется при его нулевой влажности. Для применения закона сохранения масс следует определить массы каждого химического компонента, входящего в состав составляющих шихты.

1. По заданным дозировкам шихтовых компонентов определяем массу бентонитового порошка и флюса, приходящего в состав шихты: на 100 кг концентрата приходится 0,6 кг бентонита и 1 кг флюса. Таким образом, общая масса влажной шихты составит 101,6 кг.

2. По заданным долям влажности определяем сухие массы составляющих шихты:

$$m_k^{\text{сух}} = m_k \cdot \left(1 - \frac{W_k}{100}\right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{9,9}{100}\right) = 90,1 \text{ кг.}$$

$$m_6^{\text{сyx}} = m_6 \cdot \left(1 - \frac{W_6}{100}\right) = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{6,8}{100}\right) = 0,5592 \text{ кг.}$$

$$m_{\phi}^{\text{сyx}} = m_{\phi} \cdot \left(1 - \frac{W_{\phi}}{100}\right) = 1 \cdot \left(1 - \frac{1,7}{100}\right) = 0,983 \text{ кг.}$$

3. По содержанию монооксида железа (FeO) в концентрате определяем содержание двухвалентного железа по формуле:

$$X_{\text{Fe}^{2+}} = X_{\text{FeO}} \cdot \frac{56}{72} = 28,84 \cdot \frac{56}{72} = 22,43.$$

Остальное железо будет находиться в форме высшего оксида – Fe³⁺:

$$X_{\text{Fe}^{3+}} = X_{\text{Fe}_{\text{общ}}} - X_{\text{Fe}^{2+}} = 68,24 - 22,43 = 45,81.$$

По содержанию монооксида железа (FeO) в бентоните определяем содержание двухвалентного железа по формуле:

$$X_{\text{Fe}^{2+}} = X_{\text{FeO}} \cdot \frac{56}{72} = 0 \cdot \frac{56}{72} = 0.$$

Остальное железо будет находиться в форме высшего оксида – Fe³⁺:

$$X_{\text{Fe}^{3+}} = X_{\text{Fe}_{\text{общ}}} - X_{\text{Fe}^{2+}} = 3,56 - 0 = 3,56.$$

По содержанию монооксида железа (FeO) во флюсе определяем содержание двухвалентного железа по формуле:

$$X_{\text{Fe}^{2+}} = X_{\text{FeO}} \cdot \frac{56}{72} = 0,15 \cdot \frac{56}{72} = 0,117.$$

Остальное железо будет находиться в форме высшего оксида – Fe³⁺:

$$X_{\text{Fe}^{3+}} = X_{\text{Fe}_{\text{общ}}} - X_{\text{Fe}^{2+}} = 4,02 - 0,117 = 3,903.$$

4. Определяем содержание кислорода в составе соединений

железа.

$$X_{O_2} = X_{Fe^{2+}} \cdot \frac{16}{56} + X_{Fe^{3+}} \cdot \frac{48}{112} = 22,43 \cdot \frac{16}{56} + 45,81 \cdot \frac{48}{112} = 26,04.$$

5. Определяем количество диоксида углерода (CO_2), входящего в состав CaO известняка ($CaCO_3$), находящегося во флюсе:

$$X_{CO_2} = X_{CaO} \cdot \frac{40}{56} = 30,86 \cdot \frac{40}{56} = 22,043\%.$$

Содержание CO_2 определяется только для известняка (флюса), так как в других компонентах шихты оксид кальция находится в других соединениях.

Сумма всех химических компонентов для концентрата, бентонита, флюса должна составлять $100\% \pm 0,5\%$.

6. Определяем сухую массу каждого химического компонента, входящего в состав шихты по формуле:

$$m_X = \frac{X}{100} \cdot m^{сух}$$

$$m_{K_{Fe^{2+}}}^{сух} = \frac{m_K^{сух}}{100} \cdot X_{Fe^{2+}} = \frac{90,1}{100} \cdot 22,43 = 20,21 \text{ кг.}$$

$$m_{6_{Fe^{2+}}}^{сух} = \frac{m_6^{сух}}{100} \cdot X_{Fe^{2+}} = \frac{0,559}{100} \cdot 0 = 0 \text{ кг.}$$

$$m_{\phi_{Fe^{2+}}}^{сух} = \frac{m_{\phi}^{сух}}{100} \cdot X_{Fe^{2+}} = \frac{0,983}{100} \cdot 0,117 = 0,001 \text{ кг.}$$

$$m_{K_{Fe^{3+}}}^{сух} = \frac{m_K^{сух}}{100} \cdot X_{Fe^{3+}} = \frac{90,1}{100} \cdot 45,81 = 41,274 \text{ кг.}$$

$$m_{6_{Fe^{3+}}}^{сух} = \frac{m_6^{сух}}{100} \cdot X_{Fe^{3+}} = \frac{0,5592}{100} \cdot 3,56 = 0,019 = 0,02 \text{ кг.}$$

$$m_{\phi_{Fe^{3+}}}^{сух} = \frac{m_{\phi}^{сух}}{100} \cdot X_{Fe^{3+}} = \frac{0,983}{100} \cdot 3,903 = 0,038 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{кO}_2}^{\text{сух}} = \frac{m_{\text{к}}^{\text{сух}}}{100} \cdot X_{\text{O}_2} = \frac{90,1}{100} \cdot 26,04 = 23,462 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{кCO}_2}^{\text{сух}} = \frac{m_{\text{к}}^{\text{сух}}}{100} \cdot X_{\text{CO}_2} = \frac{90,1}{100} \cdot 0 = 0,0 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{бCO}_2}^{\text{сух}} = \frac{m_{\text{б}}^{\text{сух}}}{100} \cdot X_{\text{CO}_2} = \frac{0,5592}{100} \cdot 0 = 0,0 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{фCO}_2}^{\text{сух}} = \frac{m_{\text{ф}}^{\text{сух}}}{100} \cdot X_{\text{CO}_2} = \frac{0,983}{100} \cdot 22,043 = 0,217 \text{ кг.}$$

Результаты расчётов представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Компонент шихты	Массы химических компонентов, кг															
	Конц.	Бент.	Флюс	Fe ²⁺	Fe ³⁺	O ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O + Na ₂ O	TiO ₂	ППП	CO ₂ (плюс)
Масса сухая	90,1	0,592	0,983	20,21	0,000	0,017	0,027	0,280	0,303	0,004	0,000	0,000	0,005	0,007	0,061	0,217
	90,1	0,000	0,001	41,274	0,020	0,017	0,027	0,097	0,046	0,18	0,0044	0,0004	0,070	0,023	0,252	0,0
	20,21	0,000	0,001	23,462	0,009	0,017	0,027	0,097	0,046	0,18	0,0044	0,0004	0,070	0,023	0,252	0,0
	41,274	0,020	0,001	4,091	0,295	0,017	0,027	0,097	0,046	0,18	0,0044	0,0004	0,070	0,023	0,252	0,0
	23,462	0,009	0,001	0,162	0,097	0,017	0,027	0,097	0,046	0,18	0,0044	0,0004	0,070	0,023	0,252	0,0
	4,091	0,295	0,001	0,198	0,097	0,017	0,027	0,097	0,046	0,18	0,0044	0,0004	0,070	0,023	0,252	0,0
	0,162	0,097	0,001	0,288	0,097	0,017	0,027	0,097	0,046	0,18	0,0044	0,0004	0,070	0,023	0,252	0,0
	0,198	0,046	0,001	0,0604	0,0044	0,000	0,000	0,0044	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
	0,288	0,18	0,001	0,0108	0,004	0,000	0,000	0,0044	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004
	0,0604	0,0044	0,001	0,070	0,017	0,005	0,005	0,017	0,005	0,017	0,005	0,017	0,005	0,017	0,005	0,017
	0,0108	0,0004	0,001	0,023	0,000	0,007	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	0,070	0,017	0,005	0,252	0,052	0,061	0,061	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052
	0,023	0,000	0,007	0,252	0,052	0,061	0,061	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052	0,052
	0,252	0,052	0,061	0,0	0,0	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217	0,217
	0,0	0,0	0,217													

7. Определяем массу шихты по сухому весу и её элементарный состав, для этого складываем массы каждого компонента, входящего в состав шихты, и определяем массу шихты.

$$m_{\text{х}}^{\text{ш}} = m_{\text{х}}^{\text{к}} + m_{\text{х}}^{\text{б}} + m_{\text{х}}^{\text{ф}},$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{x}}^{\text{к}} + m_{\text{x}}^{\text{б}} + m_{\text{x}}^{\text{ф}} = 90,1 + 0,5592 + 0,983 = 91,642 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{кFe}^{2+}}^{\text{сyx}} + m_{\text{бFe}^{2+}}^{\text{сyx}} + m_{\text{фFe}^{2+}}^{\text{сyx}} = 20,21 + 0,0 + 0,001 = 20,211 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{кFe}^{3+}}^{\text{сyx}} + m_{\text{бFe}^{3+}}^{\text{сyx}} + m_{\text{фFe}^{3+}}^{\text{сyx}} = 41,274 + 0,020 + 0,038 = 41,332 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{кO}_2}^{\text{сyx}} + m_{\text{бO}_2}^{\text{сyx}} + m_{\text{фO}_2}^{\text{сyx}} = 23,462 + 0,009 + 0,017 = 23,488 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{кSiO}_2}^{\text{сyx}} + m_{\text{бSiO}_2}^{\text{сyx}} + m_{\text{фSiO}_2}^{\text{сyx}} = 4,091 + 0,295 + 0,027 = 4,413 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{кAl}_2\text{O}_3}^{\text{сyx}} + m_{\text{бAl}_2\text{O}_3}^{\text{сyx}} + m_{\text{фAl}_2\text{O}_3}^{\text{сyx}} = 0,162 + 0,097 + 0,280 = 0,539 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{кCaO}}^{\text{сyx}} + m_{\text{бCaO}}^{\text{сyx}} + m_{\text{фCaO}}^{\text{сyx}} = 0,198 + 0,046 + 0,303 = 0,547 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{кMgO}}^{\text{сyx}} + m_{\text{бMgO}}^{\text{сyx}} + m_{\text{фMgO}}^{\text{сyx}} = 0,228 + 0,018 +$$

$$+ 0,004 = 0,310 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{кS}}^{\text{сyx}} + m_{\text{бS}}^{\text{сyx}} + m_{\text{фS}}^{\text{сyx}} = 0,0604 + 0,0044 + 0,0008 = 0,656 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{кP}}^{\text{сyx}} + m_{\text{бP}}^{\text{сyx}} + m_{\text{фP}}^{\text{сyx}} = 0,0108 + 0,00044 + 0,0006 = 0,656 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{кK}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}}^{\text{сyx}} + m_{\text{бK}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}}^{\text{сyx}} + m_{\text{фK}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}}^{\text{сyx}} = 0,070 + 0,017 +$$

$$+ 0,005 = 0,092 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{кTiO}_2}^{\text{сyx}} + m_{\text{бTiO}_2}^{\text{сyx}} + m_{\text{фTiO}_2}^{\text{сyx}} = 0,023 + 0,0 + 0,007 = 0,030 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{кППП}}^{\text{сyx}} + m_{\text{бППП}}^{\text{сyx}} + m_{\text{фППП}}^{\text{сyx}} = 0,0252 + 0,052 + 0,061 = 0,365 \text{ кг.}$$

$$m_{\text{сyx}}^{\text{ш}} = m_{\text{кCO}_2}^{\text{сyx}} + m_{\text{бCO}_2}^{\text{сyx}} + m_{\text{фCO}_2}^{\text{сyx}} = 0,0 + 0,0 + 0,217 = 0,217 \text{ кг.}$$

Результаты расчётов представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3

Масса шихты (сухая)	Массы химических компонентов, кг												
	Fe ²⁺	Fe ³⁺	O ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O + 4Na ₂ O	TiO ₂	ППП	CO ₂ (плюс)
91,642	20,211	41,332	23,489	4,413	0,539	0,547	0,310	0,0656	0,0118	0,092	0,030	0,365	0,217

8. Чтобы определить массу кислорода, поступающего в окатыши в процессе обжига, необходимо знать, какая часть двухвалентного железа окислится. Для этого задаёмся остаточным содержанием FeO в окатышах по окончании обжига. Например, в соответствии с требованиями стандарта организации или технических условий на окатыши остаточное содержание FeO должно составлять не более 0,5 %, тогда, учитывая погрешность химического анализа, целесообразно задаться содержанием FeO – 0,41 кг:

$$m_{\text{FeO}}^{\text{ост}} = \frac{m^{\text{ш}} \cdot (X_{\text{Fe}}^{\text{ост}} - \Delta_{\text{FeO}})}{100} = \frac{91,642 \cdot (0,5 - 0,05)}{100} = 0,41.$$

где $m^{\text{ш}}$ – масса шихты по сухому весу, кг;

$X_{\text{FeO}}^{\text{ост}}$ – остаточное содержание FeO в обожжённых окатышах, %;

Δ_{FeO} – допустимая погрешность химического анализа, %.

9. Остаточное количество серы задаётся в весовом измерении исходя из требований технических условий или минимизации содержания данного компонента в обожжённых окатышах, так как сера является вредным компонентом для последующих металлургических переделов – металлизации и доменного производства.

10. Определяем увеличение массы шихты за счёт присоединённого кислорода – окисления магнетита:

$$M_{O_2}^{\text{окисл}} = \left(m_{Fe^{2+}}^{\text{ш}} - m_{FeO}^{\text{ост}} \cdot \frac{56}{72} \right) \cdot \frac{16}{112} = \left(20,211 - 0,41 \cdot \frac{56}{72} \right) \cdot \frac{16}{112} = 2,841 \text{ кг.}$$

11. Определяем потерю массы шихты за счёт разложения известняка, выгорания серы и потерь при прокаливании:

$$M_{\text{потерь}} = m_{CO_2} + m_S - m_S^{\text{ост}} + m_{\text{ППП}} = 0,238 + 0,0656 - 0,0001 + 0,365 = 0,669 \text{ кг.}$$

12. Определяем массу шихты на выходе из обжига:

$$M_{\text{ш}}^{\text{обож}} = M_{\text{ш}}^{\text{сух}} + M_{O_2} + M_{\text{потерь}} = 91,642 + 2,841 - 0,669 = 93,814 \text{ кг.}$$

13. Определяем массы компонентов на выходе из обжига и находим процентный состав обожжённой шихты как отношение массы компонента к общей массе обожжённой шихты. Масса железа общего складывается из масс двухвалентного и трёхвалентного железа (табл. 1.2). Масса кислорода увеличивается на количество присоединённого кислорода. При проверке равенства суммарного состава обожжённой шихты (100 %), следует учитывать, что массы железа и кислорода, содержащиеся в остаточном оксиде железа – FeO, учтены соответственно в массе железа общего и кислорода.

$$M_{Fe_{\text{общ}}}^{\text{обож}} = 20,211 + 41,332 = 61,543 \text{ кг;}$$

$$M_{O_2}^{\text{обож}} = m_{O_2} + M_{O_2}^{\text{окисл}} = 23,489 + 2,841 = 26,33 \text{ кг;}$$

Процентное содержание обожжённой шихты каждого вещества рассчитаем по формуле:

$$C_{\text{ш}} \% = \frac{M_x \cdot 100}{M_{\text{общ.}}} = \frac{M_x \cdot 100}{(M_x + M_y + \dots + M_n)}, \%$$

где $C_{\text{ш}}\%$ – процентное содержание вещества;

M_x – масса вещества;

$M_{\text{общ.}}$ – общая масса, которая складывается из масс M_x, M_y, \dots, M_n – составляющих веществ.

$$C_{\text{FeO}_{\text{общ}}} \% = \frac{M_{\text{FeO}} \cdot 100}{(M_{\text{FeO}_{\text{общ}}} + M_{\text{FeO}} + M_{\text{O}_2} + M_{\text{SiO}_2} + M_{\text{Al}_2\text{O}_3} + M_{\text{CaO}} + M_{\text{MgO}} + M_{\text{S}} + M_{\text{P}} + M_{\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}} + M_{\text{TiO}_2})}, \%$$

$$C_{\text{FeO}_{\text{общ}}} \% = \frac{61,543 \cdot 100}{(61,543 + 0,41 + 26,331 + 4,413 + 0,539 + 0,547 + 0,310 + 0,0001 + 0,0118 + 0,092 + 0,030)}$$

$$= 65,6\%.$$

$$C_{\text{FeO}} \% = \frac{0,41 \cdot 100}{(61,543 + 0,41 + 26,331 + 4,413 + 0,539 + 0,547 + 0,310 + 0,0001 + 0,0118 + 0,092 + 0,030)}$$

$$= 0,44\%.$$

$$C_{\text{O}_2} \% = \frac{26,331 \cdot 100}{(61,543 + 0,41 + 26,331 + 4,413 + 0,539 + 0,547 + 0,310 + 0,0001 + 0,0118 + 0,092 + 0,030)}$$

$$= 0,33\%.$$

$$C_{\text{S}} \% = \frac{0,0001 \cdot 100}{(61,543 + 0,41 + 26,331 + 4,413 + 0,539 + 0,547 + 0,310 + 0,0001 + 0,0118 + 0,092 + 0,030)}$$

$$= 0,0001\%.$$

$$C_{\text{P}} \% = \frac{0,0118 \cdot 100}{(61,543 + 0,41 + 26,331 + 4,413 + 0,539 + 0,547 + 0,310 + 0,0001 + 0,0118 + 0,092 + 0,030)}$$

$$= 0,0126\%.$$

$$C_{\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}} \% = \frac{0,092 \cdot 100}{(61,543 + 0,41 + 26,331 + 4,413 + 0,539 + 0,547 + 0,310 + 0,0001 + 0,0118 + 0,092 + 0,030)}$$

$$= 0,100\%.$$

$$C_{\text{TiO}_2} \% = \frac{0,030 \cdot 100}{(61,543 + 0,41 + 26,331 + 4,413 + 0,539 + 0,547 + 0,310 + 0,0001 + 0,0118 + 0,092 + 0,030)}$$

$$= 0,03\%.$$

$$M_{\text{X}}^{\text{обож}} = C_{\text{FeO}_{\text{общ}}} \% + C_{\text{O}_2} \% + C_{\text{SiO}_2} \% + C_{\text{Al}_2\text{O}_3} \% + C_{\text{CaO}} \% + C_{\text{MgO}} \% + C_{\text{S}} \% + C_{\text{P}} \% + C_{\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}} \% + C_{\text{TiO}_2} \%.$$

$$M_{\text{X}}^{\text{обож}} = 65,6 + 28,07 + 4,7 + 0,57 + 0,58 + 0,33 + 0,0001 + 0,0126 +$$

$$+ 0,1 + 0,03 = 99,993.$$

Погрешность расчёта обусловлена математическим округлением значений при расчёте доли каждого компонента.

Результаты расчёта представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Масса сухая	Fe _{общ}	FeO	O ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O + 4-Na ₂ O	TiO ₂
93,814	61,543	0,41	26,33	4,413	0,539	0,547	0,310	0,0001	0,0118	0,092	0,030
100%	65,6	0,44	28,7	4,70	0,57	0,58	0,33	0,0001	0,0126	0,100	0,03

Состав обожжённой шихты – это и есть ожидаемый состав обожжённых окатышей при заданных химических составах материалов, образующих шихту окатышей, и их заданной дозировке.

3.4. Варианты заданий

Вариант 1

Рассчитать ожидаемый химический состав обожжённых окатышей, если известно, что дозировка бентонита составила 0,7 %, флюса – 1,1 %. Химические составы концентрата, бентонита и флюса представлены в таблице:

Наименование материала	Содержание химического компонента, %										
	Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O+Na ₂ O	TiO ₂	ППП
Концентрат	65,24	30,84	5,54	0,2	0,20	0,30	0,069	0,015	0,074	0,028	0,26
Бентонит	5,56		50,84	18,42	7,23	4,14	0,75	0,071	5,07		7,37
Флюс	3,02	0,17	3,75	30,53	28,86	0,35	0,071	0,07	0,49	0,81	6,1

Массовая доля влаги в концентрате – 8,8 %, в бентопорошке – 5,8 %, во флюсе – 1,9 %. Остаточное содержание серы в обожжённых окатышах принять равным 0,002 %, а монооксида железа FeO – 0,4 %.

Вариант 2

Рассчитать ожидаемый химический состав обожжённых окатышей, если известно, что дозировка бентонита составила 0,6 %, флюса – 1,1 %.

флюса — 0,8 %. Химические составы концентрата, бентонита и флюса представлены в таблице:

Наименование материала	Содержание химического компонента, %										
	Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O+Na ₂ O	TiO ₂	ППП
Концентрат	68,05	28,17	4,84	0,14	0,16	0,34	0,063	0,012	0,076	0,026	0,25
Бентонит	3,69	-	52,74	17,65	8,57	3,09	0,87	0,078	2,86	-	8,86
Флюс	4,05	0,18	2,98	29,92	30,24	0,42	0,085	0,047	0,43	0,75	5,6

Массовая доля влаги в концентрате — 9,9 %, в бентопорошке — 7,1 %, во флюсе — 1,5 %. Остаточное содержание серы в обожжённых окатышах принять равным 0,002 %, а монооксида железа FeO — 1,2 %.

Вариант 3

Рассчитать ожидаемый химический состав обожжённых окатышей, если известно, что дозировка бентонита составила 0,5 %, флюса — 2,2 %. Химические составы концентрата, бентонита и флюса представлены в таблице:

Наименование материала	Содержание химического компонента, %										
	Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O+Na ₂ O	TiO ₂	ППП
Концентрат	70,12	29,82	2,53	0,11	0,12	0,17	0,047	0,01	0,053	0,022	0,27
Бентонит	3,69	-	52,74	17,65	8,57	3,09	0,87	0,078	2,86	-	8,86
Флюс	4,05	0,18	2,98	29,92	30,24	0,42	0,085	0,047	0,43	0,75	5,6

Массовая доля влаги в концентрате — 9,8 %, в бентопорошке — 6,7 %, во флюсе — 1,7 %. Остаточное содержание серы в обожжённых окатышах принять равным 0,002 %, а монооксида железа FeO — 0,45 %.

Вариант 4

Рассчитать ожидаемый химический состав обожжённых

окатышей, если известно, что дозировка бентонита составила 0,8 %, флюса — 2,5 %. Химические составы концентрата, бентонита и флюса представлены в таблице:

Наименование материала	Содержание химического компонента, %										
	Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O+Na ₂ O	TiO ₂	ППП
Концентрат	72,12	27,82	2,73	0,09	0,15	0,14	0,057	0,02	0,043	0,012	0,28
Бентонит	2,69	-	53,74	15,65	10,57	4,09	0,85	0,080	1,86	-	9,86
Флюс	5,05	0,2	2,95	28,92	30,22	0,45	0,087	0,045	0,45	0,73	5,8

Массовая доля влаги в концентрате — 7,9 %, в бентопорошке — 7,7 %, во флюсе — 1,5 %. Остаточное содержание серы в обожжённых окатышах принять равным 0,002 %, а монооксида железа FeO — 0,55 %.

Вариант 5

Рассчитать ожидаемый химический состав обожжённых окатышей, если известно, что дозировка бентонита составила 0,9 %, флюса — 1,9 %. Химические составы концентрата, бентонита и флюса представлены в таблице:

Наименование материала	Содержание химического компонента, %										
	Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O+Na ₂ O	TiO ₂	ППП
Концентра	67,12	32,52	2,23	0,10	0,13	0,16	0,049	0,02	0,051	0,024	0,25
Бентонит	4,69	-	51,74	18,65	7,57	3,06	0,84	0,048	2,89	-	8,56
Флюс	4,07	0,16	3,98	28,92	30,34	0,52	0,075	0,057	0,46	0,72	5,3

Массовая доля влаги в концентрате — 7,5 %, в бентопорошке — 8,7 %, во флюсе — 1,8 %. Остаточное содержание серы в обожжённых окатышах принять равным 0,002 %, а монооксида железа FeO — 0,65 %.

Вариант 6

Рассчитать ожидаемый химический состав обожжённых окатышей, если известно, что дозировка бентонита составила 0,5 %, флюса — 2,3 %. Химические составы концентрата, бентонита и флюса представлены в таблице:

Наименование материала	Содержание химического компонента, %										
	Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O+Na ₂ O	TiO ₂	ППП
Концентрат	71,12	28,82	2,43	0,21	0,14	0,15	0,043	0,02	0,057	0,012	0,24
Бентонит	3,59	-	52,84	17,75	8,47	3,1	0,86	0,068	2,96	-	8,84
Флюс	4,02	0,21	2,88	30,92	29,34	0,45	0,082	0,049	0,41	0,73	5,8

Массовая доля влаги в концентрате — 7,8 %, в бентопорошке — 6,9 %, во флюсе — 1,8 %. Остаточное содержание серы в обожжённых окатышах принять равным 0,002 %, а монооксида железа FeO — 0,41 %.

Вариант 7

Рассчитать ожидаемый химический состав обожжённых окатышей, если известно, что дозировка бентонита составила 0,6 %, флюса — 2,4 %. Химические составы концентрата, бентонита и флюса представлены в таблице:

Наименование материала	Содержание химического компонента, %										
	Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O+Na ₂ O	TiO ₂	ППП
Концентрат	67,12	32,82	2,53	0,11	0,12	0,17	0,067	0,01	0,043	0,012	0,27
Бентонит	3,69	-	52,74	17,65	8,57	3,09	0,87	0,078	2,86	-	8,86
Флюс	5,05	0,19	3,97	28,92	29,24	0,42	0,065	0,067	0,53	0,65	5,6

Массовая доля влаги в концентрате — 7,8 %, в бентопорошке — 5,7 %, во флюсе — 2,7 %. Остаточное содержание серы в обожжённых окатышах принять равным 0,002 %, а монооксида железа FeO — 0,40 %.

Вариант 8

Рассчитать ожидаемый химический состав обожжённых окатышей, если известно, что дозировка бентонита составила 0,7 %, флюса — 1,9 %. Химические составы концентрата, бентонита и флюса представлены в таблице:

Наименование материала	Содержание химического компонента, %										
	Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O+Na ₂ O	TiO ₂	ППП
Концентрат	65,12	34,82	2,53	0,11	0,12	0,17	0,047	0,01	0,053	0,022	0,27
Бентонит	4,69	-	51,74	17,65	8,57	3,09	0,87	0,078	2,86	-	8,86
Флюс	5,05	0,18	3,98	28,92	29,24	0,42	0,085	0,047	0,43	0,75	5,6

Массовая доля влаги в концентрате — 7,8 %, в бентопорошке — 6,3 %, во флюсе — 1,8 %. Остаточное содержание серы в обожжённых окатышах принять равным 0,002 %, а монооксида железа FeO — 0,55 %.

Вариант 9

Рассчитать ожидаемый химический состав обожжённых окатышей, если известно, что дозировка бентонита составила 0,7 %, флюса — 2,4 %. Химические составы концентрата, бентонита и флюса представлены в таблице:

Наименование материала	Содержание химического компонента, %										
	Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O+Na ₂ O	TiO ₂	ППП
Концентрат	67,12	32,82	2,53	0,11	0,12	0,17	0,037	0,01	0,063	0,022	0,27
Бентонит	2,69	-	53,74	16,65	9,57	3,09	0,87	0,078	2,86	-	8,86
Флюс	6,05	0,18	1,98	28,92	29,24	0,42	0,085	0,047	0,43	0,75	5,6

Массовая доля влаги в концентрате — 8,9 %, в бентопорошке — 6,4 %, во флюсе — 1,5 %. Остаточное содержание серы в обожжённых окатышах принять равным 0,002 %, а монооксида железа FeO — 0,43 %.

Вариант 10

Рассчитать ожидаемый химический состав обожжённых окатышей, если известно, что дозировка бентонита составила 0,6 %, флюса — 1,8 %. Химические составы концентрата, бентонита и флюса представлены в таблице:

Наименование материала	Содержание химического компонента, %										
	Fe _{общ}	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	S	P	K ₂ O+Na ₂ O	TiO ₂	ППП
Концентрат	69,12	30,82	2,53	0,11	0,12	0,17	0,047	0,01	0,053	0,022	0,27
Бентонит	3,69	-	53,74	16,65	7,57	4,09	0,87	0,078	2,86	-	8,86
Флюс	3,02	0,21	3,98	30,92	29,24	0,42	0,085	0,047	0,43	0,75	5,6

Массовая доля влаги в концентрате — 8,5 %, в бентопорошке — 6,5 %, во флюсе — 1,5 %. Остаточное содержание серы в обожжённых окатышах принять равным 0,002 %, а монооксида железа FeO — 0,50 %.

3.5. Контрольные вопросы

1. Какими показателями оценивается эффективность обогащения?
2. Дайте определение понятию выход продукта?
3. Дайте определение понятию содержание компонента?
4. Дайте определение понятию извлечение?
5. Дайте определение понятию степень сокращения?
6. Что понимается под степенью концентрации или степенью обогащения руды?
7. При получении двух конечных продуктов обогащения, каким уравнением записывается уравнение баланса?
8. Сколько в сумме должно составлять уравнение баланса?
9. Каким символом обозначается содержание полезного компонента в руде?
10. Что характеризуют технологические показатели обогащения?

3.6. Список литературы

1. Юсфин, Ю. С. Металлургия железа [Текст]: учебник для вузов / Ю. С. Юсфин, Н. Ф. Пашков. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. – 464 с.
2. Шилаев, В. П. Основы обогащения полезных ископаемых [Текст]: учебное пособие / В. П. Шилаев. – М.: Недра, 1986. – 296 с
3. Тимофеева, А. С. Экстракция чёрных металлов из природного и техногенного сырья [Текст] / А. С. Тимофеева, Т. В. Никитченко, Е. С. Тимофеева. – Старый Оскол: ООО "ТНТ", 2017. – 303 с.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

"РАСЧЁТ МАТЕРИАЛЬНОГО БАЛАНСА ДСП-150, РАБОТАЮЩЕЙ ПО ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕПЛАВКИ ОКАТЫШЕЙ В ВАННЕ"

4.1. Цель работы

Цель работы — научиться делать расчёт, материального баланса 150-т ДСП, работающей по технологии переплавки окатышей в ванне.

4.2. Общие сведения

Ведущими аргументами расчёта шихты при выплавке электростали с использованием металлизированных окатышей являются балансы металла, углерода и кислорода.

Металл образуется в печи из скрапа, металлизированных окатышей, феррославоов, которые переходят в сталь и, частично, в шлак и пыль.

Углерод поступает в печь со скрапом, металлизированными окатышами, коксом, электродами, ферросплавами и расходуется на восстановление оксидного железа, науглероживание стали и окисление газообразным кислородом.

Кислород поступает в ДСП с окатышами (металлизированными и окисленными), с воздухом, вдувается через фурму и расходуется на окисление углерода, железа, элементов скрапа и, при его избытке, удаляется с отходящими из печи газами.

В период плавления в печи образуется шлак из оксидов пустой породы окатышей, окисляющихся элементов и мусора скрапа, извести, футеровки печи. Восстановление оксидов железа углеродом в металлизированных окатышах, имеющих отношение $O/C = 1,3 - 0,9$, в процессе их быстрого плавления электрической дугой не завершается, поэтому не восстановленные оксиды железа металлизированных и окисленных окатышей переходят в шлак. При избытке кислорода их количество возрастает.

В связи с восстановительными условиями плавления металлизированных окатышей железо в шлаке находится

преимущественно в двухвалентном состоянии.

Большая часть шлака (70-80 %) удаляется из печи в период плавления с целью дефосфорации металла и, таким образом, содержащееся в нём железо теряется безвозвратно. Остальную часть шлака раскисляют углеродом окатышей, имеющих отношение O/C меньше 0,4, или кокса и восстановленная таким образом часть железа переходит в металлическую ванну.

Масса ферросплавов определяется по формуле:

$$M = \frac{M_{\text{ок}} \cdot R_{\text{ст}}}{R_{\text{ф.с.}} \cdot K_{\text{усв}}}, \quad (4.1)$$

где $M_{\text{ок}}$ – масса окатышей:

$$M_{\text{ок}} = (1 - D_{\text{ск.}}) \cdot M_{\text{пл}}, \quad (4.2)$$

$R_{\text{ст}}$ – содержание легирующего элемента в стали;

$R_{\text{ф.с.}}$ – содержание основного легирующего элемента в ферросплаве;

$K_{\text{усв}}$ – коэффициент усвоения данного ферросплава;

$D_{\text{ск.}}$ – доля скрапа;

$M_{\text{пл.}}$ – масса плавки.

Масса дополнительных элементов, вносимых ферросплавом, рассчитывается по формуле:

$$D_x = \frac{M \cdot R_{\text{ф.с.}}}{100}, \quad (4.3)$$

где M – масса ферросплава;

$R_{\text{ф.с.}}$ – содержание элемента в ферросплаве.

Расчёт доли металлизированных окатышей и шлака находим по формуле:

$$D_{\text{м.о.}} = \frac{[100 - C_{\text{ст}} + D_{\text{шл}} \cdot \text{Fe}_{\text{шл}} + D_{\text{у}} \cdot \text{Fe}_{\text{у}} - D_{\text{ск}} \cdot \text{Fe}_{\text{ск}} - D_{\text{ф.с.}} \cdot \text{Fe}_{\text{ф.с.}}]}{[\text{Fe}_{\text{м.о.}} \cdot (1 - Y_{\text{м.о.}})]}, \quad (4.4)$$

где $C_{\text{ст}}$ – содержание углерода в готовой стали, $C_{\text{ст}} = 0,2$ %;

$D_{\text{шл}}$ – доля удалённого из печи шлака (около 0,1);

$\text{Fe}_{\text{шл}}$ – содержание железа в шлаке, принимаем 12 %;

D_y – доля уносимой из печи пыли к массе жидкой стали (обычно 0,02 – 0,03);

Fe_y – содержание железа в пыли;

$D_{ск}$ – доля скрапа;

$Fe_{ск}$ – содержание железа в скрапе;

$Fe_{ф.с.}$ – содержание железа в ферросплавах;

$Fe_{м.о.}$ – содержание железа в металлизированных окатышах;

$U_{м.о.}$ – унос металлизированной пыли.

Зная долю МОК, можно определить долю общего количества шлака в процентах по формуле:

$$D_{шл} = \left[D_{мо} \cdot \left(n + \frac{n \cdot SiO_{2п} \cdot B \cdot \frac{100}{100 - U_{изв}}}{CaO_{изв} - SiO_{2изв} \cdot B} \right) + D_{ск} \cdot \left(Si_{ск} \cdot \frac{60}{28} \cdot (B + 1) + Mn_{ск} \cdot \frac{71}{55} \right) \right] \cdot \frac{100 - U_{шл}}{100 - FeO_{шл} - MgO_{шл}}, \quad (4.5)$$

где n – содержание пустой породы в окатышах, %;

$$n = 0,058 \cdot Fe_{м.о.} \quad (4.6)$$

$SiO_{2п}$ – содержание кремнезёма в пустой породе %;

$SiO_{2изв.}$ – содержание кремнезёма в извести %;

$CaO_{изв.}$ – содержание CaO в извести %;

$U_{изв.}$ – унос извести к массе извести %;

$U_{шл.}$ – унос шлакообразующих к их массе %;

$Si_{ск}$ – содержание Si в скрапе %;

$Mn_{ск}$ – содержание Mn в скрапе %;

FeO – содержание в шлаке FeO в процентах к массе шлака;

$MgO_{шл}$ – содержание MgO в шлаке FeO в процентах к массе шлака %.

B – основность шлака.

Доля извести, перешедшей в шлак определяются по формуле:

$$D_{изв.шл.} = \frac{D_{шл} \cdot n \cdot SiO_{2п} \cdot B + D_{ск} \cdot Si_{ск} \cdot \frac{60}{28} \cdot B \cdot 100}{CaO_{изв} - SiO_{2изв} \cdot B}, \quad \% \quad (4.7)$$

Доля извести, перешедшей в пыль определяются по формуле:

$$D_{\text{изв.у}} = \frac{D_{\text{изв.шл.}}}{0,95} - D_{\text{изв.шл.}}, \% \quad (4.8)$$

Доля всей извести определится по формуле:

$$D_{\text{изв.}} = \frac{(D_{\text{изв.шл.}} + D_{\text{изв.у}})}{100} \quad (4.9)$$

Зная долю составляющих шихты, можно определить долю уносимой из печи пыли и содержание в ней железа:

$$D_y = \left(\frac{1}{1 - D_{y\text{Fe}}} - D_{\text{ст}} \right) \cdot \frac{72}{56} + \left(\frac{\frac{D_{\text{шл.}}}{100}}{1 - D_{y.\text{шл.}}} - \frac{D_{\text{шл.}}}{100} \right), \quad (4.10)$$

где $D_{\text{ст}}$ – доля стали;

$D_{y\text{Fe}}$ – доля уноса железа стали;

$D_{y.\text{шл.}}$ – доля уноса шлака.

Содержание железа в уносимой пыли определяется по формуле:

$$\text{Fe}_y = \frac{D_y \cdot \text{Fe}}{D_y} \cdot 100. \quad (4.11)$$

Содержание углерода в стали из окатышей определяется по формуле:

$$C_{\text{ст}} = \frac{D_{\text{шл.}}}{100} \cdot \text{Fe}_{\text{шл.}} \cdot \frac{12}{56}. \quad (4.12)$$

Содержание прореагировавшего реакционного углерода в окатышах определяется по формуле:

$$C_p = C_{\text{мо}} - \frac{C_{\text{ст}}}{D_{\text{мо}}}, \quad (4.13)$$

где $C_{\text{мо}}$ – содержание общего углерода в окатышах %.

Приход и расход металла можно рассчитать по формуле:

Экстракция чёрных металлов из природного и техногенного сырья

$$\begin{aligned}
 M_{\text{сум}} &= D_{\text{мо}} \cdot Fe_{\text{мо}} + D_{\text{ск}} \cdot Fe_{\text{ск}} + D_{\text{ф.с.}} \cdot Fe_{\text{ф.с.}} = \\
 &= 100 - S_{\text{ст}} + D_{\text{шл.у}} + Fe_{\text{шл.}} + D_{\text{у}} \cdot Fe_{\text{у}}, \quad (4.14)
 \end{aligned}$$

где $M_{\text{ф.с.}}$ – содержание металла в ферросплаве.

Приход:

$$M_1 = D_{\text{мо}} \cdot Fe_{\text{общ}} + D_{\text{ск}} \cdot Fe_{\text{ск}} + D_{\text{ф.с.}} \cdot Fe_{\text{ф.с.}}, \quad (4.15)$$

Расход:

$$M_2 = 100 - C_{\text{ст}} + D_{\text{ст}} \cdot Fe_{\text{шл}} + D_{\text{у}} \cdot Fe_{\text{шл}}, \quad (4.16)$$

Баланс кислорода определим по формуле:

Приход:

$$O_1 = D_{\text{мо}} \cdot \frac{O}{C} \cdot C_{\text{мо}}, \quad (4.17)$$

Расход:

$$O_2 = D_{\text{мо}} \cdot C_{\text{р}} \cdot \frac{16}{12} + D_{\text{шл.}} \cdot Fe_{\text{шл.}} \cdot \frac{16}{56} + \frac{D_{\text{ст}} \cdot m}{C_{\text{ст}}} + D_{\text{у}} \cdot Fe_{\text{у}} \cdot \frac{16}{56} \cdot \frac{CM}{100} + D_{\text{ск}} \cdot O_{\text{ск}}, \quad (4.18)$$

где $O/C = 1,2$;

CM – степень металлизации окатышей, 94,64 %;

m – в зависимости от содержания углерода, температуры и других факторов может быть 0,004 – 0,01;

$O_{\text{ск}}$ – расход кислорода на окисление Si и Mn.

$$O_{\text{ск}} = Si_{\text{ск}} \cdot \frac{32}{28} + Mn_{\text{ск}} \cdot \frac{16}{56}, \quad (4.19)$$

где $Si_{\text{ск}}$ – содержание кремния в скрапе;

$Mn_{\text{ск}}$ – содержание марганца в скрапе;

Следовательно, недостаток кислорода составит:

$$O = O_2 - O_1. \quad (4.20)$$

Металлизированная пыль, очевидно, окислится кислородом воздуха, поэтому остальной недостаток определится по формуле:

$$O_3 = O - D_y \cdot Fe_y \cdot \frac{16}{56} \cdot \frac{CM}{100}. \quad (4.21)$$

Следует компенсировать окисленными окатышами или газообразным кислородом.

Определение содержания серы, фосфора и коэффициентов распределения между шлаком и металлом

$$S_{\text{сум}} = D_{\text{мо}} \cdot S_{\text{мо}} + D_{\text{ск}} \cdot S_{\text{ск}} + \frac{D_{\text{изв}}}{100} \cdot S_{\text{изв}} + D_{\text{ф.с.}} \cdot S_{\text{ф.с.}}, \quad (4.22)$$

где $S_{\text{мо}}$ – содержание серы в окатышах, %,

$S_{\text{ск}}$ – содержание серы в скрапе %,

$S_{\text{ст}}$ – содержание серы в готовой стали %,

$S_{\text{изв}}$ – содержание серы в извести %.

$S_{\text{ф.с.}}$ – содержание серы в ферросплавах:

$$S_{\text{ф.с.}} = \frac{(10 + 85 + 6 + 9) \cdot 10^{-5}}{2,6} \cdot 100 = 0,04, \quad (4.23)$$

$$S_{\text{шл}} = \frac{S_{\text{сум}} - S_{\text{ст}}}{D_{\text{шл}}} \cdot 100, \quad (4.24)$$

$$L_S = \frac{S_{\text{шл}}}{S_{\text{ст}}}. \quad (4.25)$$

Для железистого шлака такой коэффициент распределения недостижим, поэтому необходимо раскисление конечного шлака. Между удаляемым шлаком (12 % Fe и $Ca/SiO_2 = 2$) и нераскисленным металлом величина коэффициента распределения $L_S = 3$ и после удаления этого шлака в печи останется:

$$S_1 = S_{\text{сум}} - S_{\text{ст}} \cdot L_S \cdot D_{\text{шл},y}, \quad (4.26)$$

серы, для удаления которой необходима величина:

$$Z_{S1} = \frac{S_1 - S_{ст}}{D_{шл.ост} \cdot S_{ст}} \quad (4.27)$$

где $D_{шл.ост}$ – доля оставленного шлака после периода расплавления всей жидкой стали шихты к массе.

Данный коэффициент распределения достигается при выпуске раскисленной стали, совместно с хорошо раскисленным шлаком, имеющем основность 2 и выше 2. При этом необходимо использовать шлак с более высокой основностью или обработку синтетическим шлаком, порошкообразным десульфуратором, с использованием продувки стали аргоном.

$$P_{сум} = D_{мо} \cdot P_{мо} + D_{ск} \cdot P_{ск} + \frac{D_{изв}}{100} \cdot P_{изв} + D_{ф.с.} \cdot P_{ф.с.}, \quad (4.28)$$

где $P_{мо}$ – содержание фосфора в окатышах %;

$P_{ск}$ – содержание фосфора в скрапе %;

$P_{ст}$ – содержание фосфора в стали %;

$P_{изв}$ – содержание фосфора в извести %;

$P_{ф.с.}$ – содержание фосфора в ферросплавах %;

$$P_{ф.с.} = \frac{(0,416 + 0,25 + 1) \cdot 10^{-3}}{3,78} \cdot 100 = 0,042, \quad (4.29)$$

$$P_{шл} = \frac{P_{шл} - P_{ст}}{D_{шл}} \cdot 100, \quad (4.30)$$

$$Z_P = \frac{P_{шл}}{P_{ст}}. \quad (4.31)$$

При необходимости получения более низкого содержания фосфора в стали следует увеличить основность удаляемого шлака до 2,5-3,5 или исключить из шихты покупной скрап.

Баланс углерода

Приход:

$$C_1 = D_{мо} \cdot C_{мо} + D_{ск} \cdot C_{ск} + D_e \cdot C_e + D_{ф.с.} \cdot C_{ф.с.}, \quad (4.32)$$

где D_e – доля электродов к массе жидкой стали (т.е. та часть, которая поступит в металл);

C_e – содержание углерода в электродах %;

$C_{ф.с.}$ содержание углерода в ферросплавах %.

Расход:

где C_y – содержание углерода в уносимой пыли.

$$C_2 = C_{ст} + D_{шл.сот} \cdot Fe_{шл} \cdot \frac{12}{56} + D_{мо} \cdot C_p + D_y \cdot C_y, \quad (4.33)$$

Материальный баланс плавки ЖМО в ДСП

Для баланса приводятся данные из расчёта шихты. Кроме этого, в приходной части учитывается переход футеровки в шлак ($F_{шл}$), исходя из количества шлака ($D_{шл}$) и содержания в нём и в футеровке оксида магния ($MgO_{шл}$, $MgO_{ф}$). Переход футеровки в шлак (кг):

$$F_{шл} = \frac{D_{шл}}{100} \cdot \frac{MgO_{шл} \cdot 1000 \cdot 100}{MgO_{фут} \cdot 100}, \quad (4.34)$$

где $MgO_{фут}$ – содержание MgO в футеровке %.

В расходной части учтём количество CO, исходя из доли металлизированных окатышей, и содержание реакционного углерода в них:

$$CO_{газ} = D_{мо} \cdot C_p \cdot \frac{280}{12}. \quad (4.35)$$

При дожигании CO кислородом масса CO_2 будет равна: $G = CO_{газ} \cdot \frac{44}{28} = 50$, в том числе кислорода:

$$G_1 = G - CO_{газ}. \quad (4.36)$$

При дожигании CO кислородом воздуха масса воздуха и дыма будет равна:

$$CO_2 = CO_{газ} \cdot \frac{44}{28}, \quad (4.37)$$

$$N_2 = CO_{\text{газ}} \cdot \frac{16 \cdot D_{N_2}}{28 \cdot D_{O_2}} \quad (4.38)$$

где D_{N_2} – доля азота в воздухе,

D_{O_2} – доля кислорода в воздухе.

Дым:

$$D_m = CO_2 + N_2 \quad (4.39)$$

Воздух:

$$W = G_1 + N_2 \quad (4.40)$$

4.3. Порядок и пример выполнения работы

Расчёт материального баланса для ДСП-150 ведём для марки стали 20ХГН. Химический состав стали приведён в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Химический состав стали 20ХГН

C	Si	Mn	Cr	Ni
0,2	0,35	0,4	1,3	0,5

Расчёт доли ферросплавов

Масса ферросплавов определяется по формуле:

$$M = \frac{M_{\text{ок}} \cdot R_{\text{ст}}}{R_{\text{ф.с.}} \cdot K_{\text{усв}}}$$

где $M_{\text{ок}}$ – масса окатышей:

$$M_{\text{ок}} = (1 - D_{\text{ск.}}) \cdot M_{\text{пл.}} = (1 - 0,35) \cdot 150 = 97,5 \text{т};$$

$R_{\text{ст}}$ – содержание легирующего элемента в стали;

$R_{\text{ф.с.}}$ – содержание основного легирующего элемента в ферросплаве (табл. 4.2);

$K_{\text{усв}}$ – коэффициент усвоения данного ферросплава (табл. 4.2);

$D_{\text{ск.}}$ – доля скрапа = 0,35;

$M_{\text{пл.}}$ – масса плавки = 150 т.

Таблица 4.2
Химический состав ферросплавов и коэффициенты усвоения

Ф/сплав	C	Cr	P	Cu	Mn	S	Si	Al	Fe	Ti, Mo, Ni	$K_{\text{усв}}$
ФТи30							5,7	8	ост	32,8	0,5
ФМо60	0,04		0,03	0,4		0,07	0,5		-/-	63,2	0,97
ФМн45	1,5		0,3		89,9	0,02	2,5		-/-		0,9
ФМн75	6,4		0,56		78,1		1,6		-/-		0,85
ФМн75АС6	5,9		0,05		78		3,5		-/-		0,8
ФМн-78К	6,8		0,34		79,6	0,02	0,8		-/-		0,8
ФХ003А	0,02	77,5	0,01				0,2		-/-		0,95
ФХ-100	1	70	0,03			0,02	1		-/-		0,9
ФХ-800	8	69,6	0,03			0,06	0,4		-/-		0,85
Азотированный ФХН-600А	0,89	66	0,02			0,02	0,9		-/-	6,4	0,6
Никель-3	0,01			0,43		0,023			-/-	98,6	0,99
Медь электролитическая				98					-/-		0,97
Ферросилиций ФС-65		0,4	0,05		0,4	0,02	65	2,5	-/-		0,7
Феррованадий ФВд-35А	0,75						2	1,5	-/-	35	0,9

Масса дополнительных элементов, вносимых ферросплавом, рассчитывается по формуле:

$$D_x = \frac{M \cdot R_{\text{ф.с.}}}{100},$$

где M – масса ферросплава, $R_{\text{ф.с.}}$ – содержание элемента в ферросплаве.

Ферросилиций ФС-65.

$R_{\text{ст.}}(\text{Si}) = 0,35 \%$

$R_{\text{ф.с.}}(\text{Si}) = 0,65 \%$

Экстракция чёрных металлов из природного и техногенного сырья

$$K_{\text{ув.}} = 0,7$$

$$M_{\text{ок}} = 101,1 \text{ т}$$

$$M_{\text{Фс}} = \frac{101,1 \cdot 0,35}{65 \cdot 0,7} = 0,75 \text{ т.}$$

Масса, вносимая хромом:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{Cr}) = 0,4 \%$$

$$D_x(\text{Cr}) = \frac{0,75 \cdot 0,4}{100} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ т.}$$

Масса, вносимая марганцем:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{Mn}) = 0,4 \%$$

$$D_x(\text{Mn}) = \frac{0,75 \cdot 0,4}{100} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ т.}$$

Масса, вносимая алюминием:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{Al}) = 2,5 \%$$

$$D_x(\text{Al}) = \frac{0,75 \cdot 2,5}{100} = 0,0125 \text{ т.}$$

Масса, вносимая фосфором:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{P}) = 0,05 \%$$

$$D_x(\text{P}) = \frac{0,75 \cdot 0,05}{100} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ т.}$$

Масса, вносимая серой:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{S}) = 0,02 \%$$

$$D_x(\text{S}) = \frac{0,75 \cdot 0,02}{100} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ т.}$$

Ферромарганец ФМн-45.

$$R_{\text{ст.}}(\text{Mn}) = 0,4 \%$$

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{Mn}) = 89,9 \%$$

$$K_{\text{ув.}} = 0,9$$

Экстракция чёрных металлов из природного и техногенного сырья

$$M_{\text{ок}} = 101,1 \text{ т}$$

$$M_{\text{ФМн}} = \frac{101,1 \cdot 0,4}{89,9 \cdot 0,9} = 0,482 \text{ т.}$$

Масса, вносимая кремнием:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{Si}) = 2,5 \%$$

$$D_x(\text{Si}) = \frac{0,482 \cdot 2,5}{100} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ т.}$$

Масса, вносимая фосфором:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{P}) = 0,3 \%$$

$$D_x(\text{P}) = \frac{0,482 \cdot 0,3}{100} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ т.}$$

Масса, вносимая углеродом:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{C}) = 1,5 \%$$

$$D_x(\text{C}) = \frac{0,482 \cdot 1,5}{100} = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ т.}$$

Феррохром ФХ-800.

$$R_{\text{ст.}}(\text{Cr}) = 1,3 \%$$

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{Cr}) = 69,6 \%$$

$$K_{\text{ув.}} = 0,85$$

$$M_{\text{ок}} = 101,1 \text{ т}$$

$$M_{\text{ФХ}} = \frac{101,1 \cdot 1,3}{69,6 \cdot 0,85} = 2,14 \text{ т.}$$

$$D_x(\text{C}) = \frac{2,14 \cdot 69,6}{100} = 1,49 \text{ т.}$$

Масса, вносимая кремнием:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{Si}) = 0,4 \%$$

$$D_x(\text{Si}) = \frac{2,14 \cdot 0,4}{100} = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ т.}$$

Экстракция чёрных металлов из природного и техногенного сырья

Масса, вносимая углеродом:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{C}) = 8 \%$$

$$D_x(\text{C}) = \frac{2,14 \cdot 8}{100} = 0,114 \text{ т.}$$

Масса, вносимая фосфором:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{P}) = 0,03 \%$$

$$D_x(\text{P}) = \frac{2,14 \cdot 0,03}{100} = 4,4 \cdot 10^{-4} \text{ т.}$$

Масса, вносимая серой:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{S}) = 0,06 \%$$

$$D_x(\text{S}) = \frac{2,14 \cdot 0,06}{100} = 8,6 \cdot 10^{-4} \text{ т.}$$

Никель металлический Н-3.

$$R_{\text{ст.}}(\text{Ni}) = 0,5 \%$$

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{Ni}) = 98,9 \%$$

$$K_{\text{усв.}} = 0,99$$

$$M_{\text{ок}} = 101,1 \text{ т}$$

$$M_{\text{Н-3}} = \frac{101,1 \cdot 0,5}{98,6 \cdot 0,99} = 0,5 \text{ т.}$$

Масса, вносимая медью:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{Cu}) = 0,43 \%$$

$$D_x(\text{Cu}) = \frac{0,5 \cdot 0,43}{100} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ т.}$$

Масса, вносимая углеродом:

$$R_{\text{ф.с.}}(\text{C}) = 0,01 \%$$

$$D_x(\text{C}) = \frac{0,5 \cdot 0,01}{100} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ т.}$$

Масса, вносимая серой:

Экстракция чёрных металлов из природного и техногенного сырья

$$R_{\text{ф.с.}}(S) = 0,023 \%$$

$$D_x(S) = \frac{0,5 \cdot 0,023}{100} = 7,65 \cdot 10^{-5} \text{ т.}$$

Масса всех ферросплавов:

$$M_{\Sigma} = 0,75 + 0,482 + 2,142 + 0,5 = 3,874 \text{ т.}$$

Доля ферросплавов в стали:

$$D_{\text{ф.с.}} = \frac{M_{\Sigma}}{M_{\text{пл}}} = \frac{3,874}{150} = 0,0258.$$

где $M_{\text{пл}}$ – масса плавки, равная 150 т.

Результаты расчётов заносим в таблицу 4.3.

Таблица 4.3

Марка ферросплава	Масса элемента, вносимого в шихту, т								
	C	Cr	P	Cu	Mn	S	Si	Ai	Ni
ФС-65	-	$2 \cdot 10^{-3}$	0,00025	-	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,75	0,0125	
ФМН-45	0,0048	-	$1 \cdot 10^{-3}$	-	0,482	-	$8 \cdot 10^{-3}$	-	
ФХ-800	0,1144	1,49	0,000428	-	-	0,000857	$5,7 \cdot 10^{-3}$	-	
Н-3	$5 \cdot 10^{-5}$	-	-	0,0014	-	$7,6 \cdot 10^{-5}$	-	-	0,5

Расчёт доли металлизированных окатышей и шлака

Находим по формуле:

$$D_{\text{м.о.}} = \frac{[100 - C_{\text{ст}} + D_{\text{шл}} \cdot \text{Fe}_{\text{шл}} + D_y \cdot \text{Fe}_y - D_{\text{ск}} \cdot \text{Fe}_{\text{ск}} - D_{\text{ф.с.}} \cdot \text{Fe}_{\text{ф.с.}}]}{[\text{Fe}_{\text{м.о.}} \cdot (1 - Y_{\text{м.о.}})]},$$

где $C_{\text{ст}}$ – содержание углерода в готовой стали, $C_{\text{ст}} = 0,2 \%$;

$D_{\text{шл}}$ – доля удалённого из печи шлака (около 0,1);

$\text{Fe}_{\text{шл}}$ – содержание железа в шлаке, принимаем 12 %;

D_y – доля уносимой из печи пыли к массе жидкой стали (обычно 0,02 – 0,03), принимаем 0,02;

Fe_y – содержание железа в пыли, равное 65 %;

$D_{ск}$ – доля скрапа;

$Fe_{ск}$ – содержание железа в скрапе, $Fe_{ск} = 98,55 \%$;

$Fe_{ф.с.}$ – содержание железа в ферросплавах, $Fe_{ф.с.} = 99,84 \%$;

$Fe_{м.о.}$ – содержание железа в металлизированных окатышах,
 $Fe_{м.о.} = 96,8 \%$;

$У_{м.о.}$ – унос металлизированной пыли, принимаем 0,02.

$$D_{м.о.} = \frac{[100 - 0,2 + 0,1 \cdot 12 + 0,02 \cdot 65 - 0,35 \cdot 98,55 - 0,0258 \cdot 99,84]}{[96,8 \cdot (1 - 0,02)]} =$$

$$= 0,687.$$

Расчёт доли шлака

Зная долю МОК, определим долю общего количества шлака в процентах по формуле:

$$D_{шл} = \left[D_{мо} \cdot \left(n + \frac{n \cdot SiO_{2n} \cdot B \cdot \frac{100}{100 - Y_{изв}}}{CaO_{изв} - SiO_{2,изв} \cdot B} \right) + D_{ск} \cdot \left(Si_{ск} \cdot \frac{60}{28} \cdot (B + 1) + Mn_{ск} \cdot \frac{71}{55} \right) \right] \cdot \frac{100 - Y_{шл}}{100 - FeO_{шл} - MgO_{шл}},$$

где n – содержание пустой породы в окатышах, %;

$n = 0,058 \cdot Fe_{м.о.} = 0,058 \cdot 96,8 = 5,614 \%$,

SiO_{2n} – содержание кремнезёма в пустой породе, принимаем 75 %;

$SiO_{2,изв.}$ – содержание кремнезёма в извести, принимаем 2 %;

$CaO_{изв.}$ – содержание CaO в извести, принимаем 96 %;

$У_{изв.}$ – унос извести к массе извести, принимаем 5 %;

$У_{шл.}$ – унос шлакообразующих к их массе, принимаем 5 %;

$Si_{ск}$ – содержание Si в скрапе – 0,2 %;

$Mn_{ск}$ – содержание Mn в скрапе – 0,5 %;

FeO – содержание в шлаке FeO в процентах к массе шлака;

$$FeO_{шл} = \frac{12}{56} \cdot 72 = 15,43;$$

$MgO_{шл}$ – содержание MgO в шлаке FeO в процентах к массе

шлака, обычно 6 – 15 %, принимаем MgO – 8 %.

B – основность шлака, принимаем 2.

$$D_{\text{шл}} = \left[0,687 \cdot \left(5,614 + \frac{5,614 \cdot 75 \cdot 2 \cdot \frac{100}{100-5}}{96-2 \cdot 2} \right) + 0,35 \cdot \left(0,2 \cdot \frac{60}{28} \cdot 3 + 0,5 \cdot \frac{71}{55} \right) \right] \cdot \frac{100 - 5}{100 - 15,43 - 8} = 13,84\%.$$

Доля извести, перешедшей в шлак:

$$D_{\text{изв.шл.}} = \frac{D_{\text{шл}} \cdot n \cdot SiO_{2n} \cdot B + D_{\text{ск}} \cdot Si_{\text{ск}} \cdot \frac{60}{28} \cdot B \cdot 100}{CaO_{\text{изв}} - SiO_{2\text{изв}} \cdot B}$$

$$D_{\text{изв.шл.}} = \frac{0,687 \cdot 5,614 \cdot 75 \cdot 2 + 0,36 \cdot 0,2 \cdot \frac{60}{28} \cdot 2 \cdot 100}{96 - 2 \cdot 2} = 6,29\%.$$

Доля извести, перешедшей в пыль:

$$D_{\text{изв.у}} = \frac{D_{\text{изв.шл.}}}{0,95} - D_{\text{изв.шл.}} = \frac{6,29}{0,95} - 6,29 = 0,33\%.$$

Доля всей извести:

$$D_{\text{изв.}} = \frac{(D_{\text{изв.шл.}} + D_{\text{изв.у}})}{100} = \frac{(6,29 + 0,33)}{100} = 0,066.$$

Расчёт количества и состава пыли, уносимой из печи.

Зная долю составляющих шихты, определим долю уносимой из печи пыли и содержание в ней железа:

$$D_y = \left(\frac{1}{1 - D_{yFe}} - D_{\text{ст}} \right) \cdot \frac{72}{56} + \left(\frac{\frac{D_{\text{шл}}}{100}}{1 - D_{y.\text{шл.}}} - \frac{D_{\text{шл.}}}{100} \right),$$

где $D_{\text{ст}}$ – доля стали, равная 1;

D_{yFe} – доля уноса железа стали, равная 0,02;

$D_{y.\text{шл.}}$ – доля уноса шлака, равная 0,05.

$$D_y = \left(\frac{1}{1 - 0,02} - 1 \right) \cdot \frac{72}{56} + \frac{0,1384}{1 - 0,05} - 0,1384 = 3,3 \cdot 10^{-2}.$$

Содержание железа в уносимой пыли:

$$Fe_y = \frac{D_y \cdot Fe}{D_y} \cdot 100 = \frac{0,02}{3,33 \cdot 10^{-2}} \cdot 100 = 59,65.$$

Определение доли окатышей на плавку

Содержание углерода в стали из окатышей:

$$C_{ст} = \frac{D_{шл}}{100} \cdot Fe_{шл} \cdot \frac{12}{56} = \frac{13,84}{100} \cdot 12 \cdot \frac{12}{56} = 0,356.$$

Содержание прореагировавшего реакционного углерода в окатышах:

$$C_p = C_{мо} - \frac{C_{ст}}{D_{мо}},$$

где $C_{мо}$ – содержание общего углерода в окатышах, равное 2,5 %.

$$C_p = 2,5 - \frac{0,356}{0,687} = 1,14.$$

Проверка баланса металла

Приход и расход металла выразим формулой:

$$\begin{aligned} M_{сум} &= D_{мо} \cdot Fe_{мо} + D_{ск} \cdot Fe_{ск} + D_{ф.с.} \cdot Fe_{ф.с.} = \\ &= 100 - S_{ст} + D_{шл,y} + Fe_{шл} + D_y \cdot Fe_y, \end{aligned}$$

где $M_{ф.с.}$ – содержание металла в ферросплаве (в углеродистых около 93 %).

Приход:

$$M_1 = D_{\text{мо}} \cdot Fe_{\text{общ}} + D_{\text{ск}} \cdot Fe_{\text{ск}} + D_{\text{ф.с.}} \cdot Fe_{\text{ф.с.}}$$

$$M_1 = 0,687 \cdot 94,64 + 0,35 \cdot 98,55 + 0,026 \cdot 99,84 = 102,11.$$

Расход:

$$M_2 = 100 - C_{\text{ст}} + D_{\text{ст}} \cdot Fe_{\text{шл}} + D_y \cdot Fe_{\text{шл}}$$

$$M_2 = 100 - 0,2 + 0,1 \cdot 12 + 0,038 \cdot 59,66 = 102,11.$$

Баланс кислорода

Баланс кислорода составим исходя из известных данных по формуле:

Приход:

$$O_1 = D_{\text{мо}} \cdot \frac{O}{C} \cdot C_{\text{мо}}$$

Расход:

$$O_2 = D_{\text{мо}} \cdot C_p \frac{16}{12} + D_{\text{шл}} \cdot Fe_{\text{шл}} \cdot \frac{16}{56} + \frac{D_{\text{ст}} \cdot m}{C_{\text{ст}}} + D_y \cdot Fe_y \cdot \frac{16}{56} \cdot \frac{CM}{100} + D_{\text{ск}} \cdot O_{\text{ск}}$$

где $O/C = 1,2$;

CM – степень металлизации окатышей, 94,64 %;

m – в зависимости от содержания углерода, температуры и других факторов может быть 0,004 – 0,01. Принимаем 0,007;

$O_{\text{ск}}$ – расход кислорода на окисление Si и Mn.

$$O_{\text{ск}} = Si_{\text{ск}} \cdot \frac{32}{28} + Mn_{\text{ск}} \cdot \frac{16}{56}$$

где $Si_{\text{ск}}$ – содержание кремния в скрапе, равно 0,2;

$Mn_{\text{ск}}$ – содержание марганца в скрапе, равно 0,5;

$$O_{\text{ск}} = 0,2 \cdot \frac{32}{28} + 0,5 \cdot \frac{16}{56} = 0,37.$$

Приход:

$$O_1 = 0,687 \cdot 1,2 \cdot 2,5 = 2,06.$$

Расход:

$$O_2 = 0,687 \cdot 1,98 \cdot \frac{16}{12} + 0,1 \cdot 12 \cdot \frac{16}{56} + \frac{1 \cdot 0,007}{0,2} + 0,033 \cdot 59,65 \cdot \frac{16}{56} \cdot \frac{94,64}{100} + 0,35 \cdot 0,37 = 2,69.$$

Следовательно, недостаток кислорода составит:

$$O = O_2 - O_1 = 2,69 - 2,06 = 0,63.$$

Металлизированная пыль, очевидно, окислится кислородом воздуха, остальной недостаток:

$$O_3 = O - D_y \cdot Fe_y \cdot \frac{16}{56} \cdot \frac{CM}{100} = 0,63 - 0,033 \cdot 59,65 \cdot \frac{16}{56} \cdot \frac{94,64}{100} = 0,092.$$

следует компенсировать окисленными окатышами или газообразным кислородом.

Определение содержания серы, фосфора и коэффициентов распределения между шлаком и металлом

$$S_{сум} = D_{мо} \cdot S_{мо} + D_{ск} \cdot S_{ск} + \frac{D_{изв}}{100} \cdot S_{изв} + D_{ф.с.} \cdot S_{ф.с.};$$

где $S_{мо}$ – содержание серы в окатышах = 0,002 %.

$S_{ск}$ – содержание серы в скрапе = 0,05 %.

$S_{ст}$ – содержание серы в готовой стали = 0,005 %.

$S_{изв}$ – содержание серы в извести = 0,02 %.

$S_{ф.с.}$ – содержание серы в ферросплавах:

$$S_{ф.с.} = \frac{(10 + 85 + 6 + 9) \cdot 10^{-5}}{2,6} \cdot 100 = 0,04;$$

$$S_{сум} = 0,687 \cdot 0,002 + 0,35 \cdot 0,05 + \frac{6,6}{100} \cdot 0,02 + 0,026 \cdot 0,04 = 20,9 \cdot 10^{-3} \%;$$

$$S_{\text{шл}} = \frac{S_{\text{сум}} - S_{\text{ст}}}{D_{\text{шл}}} \cdot 100 = \frac{20,9 \cdot 10^{-3} - 0,005}{13,84} \cdot 100 = 0,115;$$

$$L_S = \frac{S_{\text{шл}}}{S_{\text{ст}}} = \frac{0,115}{0,005} = 23.$$

Для железистого шлака такой коэффициент распределения недостижим, поэтому необходимо раскисление конечного шлака. Между удаляемым шлаком (12 % Fe и $\text{Ca/SiO}_2 = 2$) и нераскисленным металлом величина коэффициента распределения $L_S = 3$ и после удаления этого шлака в печи останется:

$$S_1 = S_{\text{сум}} - S_{\text{ст}} \cdot L_S \cdot D_{\text{шл.у}} = 20,9 \cdot 10^{-3} - 0,005 \cdot 23 \cdot 0,05 = 0,015,$$

серы, для удаления которой необходима величина:

$$Z_{S1} = \frac{S_1 - S_{\text{ст}}}{D_{\text{шл.ост}} \cdot S_{\text{ст}}} = \frac{(0,015 - 0,005)}{(0,055 \cdot 0,005)} = 37,$$

где $D_{\text{шл.ост}}$ – доля оставленного шлака после периода расплавления всей жидкой стали шихты к массе (обычно 0,055).

Данный коэффициент распределения достигается при выпуске раскисленной стали, совместно с хорошо раскисленным шлаком, имеющем основность 2 и выше 2. При этом необходимо использовать шлак с более высокой основностью или обработку синтетическим шлаком, порошкообразным десульфуратором, с использованием продувки стали аргоном.

$$P_{\text{сум}} = D_{\text{мо}} \cdot P_{\text{мо}} + D_{\text{ск}} \cdot P_{\text{ск}} + \frac{D_{\text{изв}}}{100} \cdot P_{\text{изв}} + D_{\text{ф.с.}} \cdot P_{\text{ф.с.}}$$

где $P_{\text{мо}}$ – содержание фосфора в окатышах = 0,011 %;

$P_{\text{ск}}$ – содержание фосфора в скрапе = 0,05 %;

$P_{\text{ст}}$ – содержание фосфора в стали = 0,005 %;

$P_{\text{изв}}$ – содержание фосфора в извести = 0,02 %;

$P_{\text{ф.с.}}$ – содержание фосфора в ферросплавах = 0,25 %;

$$P_{\text{ф.с.}} = \frac{(0,416 + 0,25 + 1) \cdot 10^{-3}}{3,78} \cdot 100 = 0,042,$$

$$P_{\text{сум}} = 0,687 \cdot 0,011 + 0,35 \cdot 0,05 + \frac{6,6}{100} \cdot 0,02 + 0,042 \cdot 0,026 = 26,4 \cdot 10^{-3},$$

$$P_{\text{шл}} = \frac{P_{\text{шл}} - P_{\text{ст}}}{D_{\text{шл}}} \cdot 100 = \frac{26,4 \cdot 10^{-3} - 0,005}{13,84} \cdot 100 = 0,155,$$

$$Z_P = \frac{P_{\text{шл}}}{P_{\text{ст}}} = \frac{0,155}{0,005} = 31.$$

что достижимо при содержании железа в шлаке 13 % и его основности 2 и выше. При необходимости получения более низкого содержания фосфора в стали следует увеличить основность удаляемого шлака до 2,5-3,5 или исключить из шихты покупной скрап.

Баланс углерода

Приход:

$$C_1 = D_{\text{мо}} \cdot C_{\text{мо}} + D_{\text{ск}} \cdot C_{\text{ск}} + D_e \cdot C_e + D_{\text{ф.с.}} \cdot C_{\text{ф.с.}}$$

где D_e – доля электродов к массе жидкой стали (т.е. та часть, которая поступит в металл) = 0,001;

C_e – содержание углерода в электродах = 98 %;

$C_{\text{ф.с.}}$ содержание углерода в ферросплавах – 2,7 %.

$$C_1 = 0,687 \cdot 2,5 + 0,35 \cdot 0,2 + 0,001 \cdot 98 + 0,026 \cdot 0,12 = 1,89.$$

Расход:

$$C_2 = C_{\text{ст}} + D_{\text{шл.сот}} \cdot Fe_{\text{шл}} \cdot \frac{12}{56} + D_{\text{мо}} \cdot C_p + D_y \cdot C_y,$$

где C_y – содержание углерода в уносимой пыли = 2 %.

$$C_2 = 0,2 + 0,055 \cdot 12 \cdot \frac{12}{56} + 0,687 \cdot 1,98 + 0,02 \cdot 2 = 1,77.$$

Материальный баланс плавки ЖМО в ДСП

В таблицу баланса введём данные из расчёта шихты. Кроме этого, в приходной части учтём переход футеровки в шлак ($F_{\text{шл}}$), исходя из количества шлака ($D_{\text{шл}}$) и содержания в нём и в футеровке

оксида магния ($MgO_{\text{шл}}$, $MgO_{\text{ф}}$), Переход футеровки в шлак (кг):

$$F_{\text{шл}} = \frac{D_{\text{шл}}}{100} \cdot \frac{MgO_{\text{шл}} \cdot 1000 \cdot 100}{MgO_{\text{фут}} \cdot 100},$$

где $MgO_{\text{фут}}$ – содержание MgO в футеровке = 98 %.

$$F_{\text{шл}} = \frac{13,84}{100} \cdot \frac{8 \cdot 1000 \cdot 100}{98 \cdot 100} = 11,3.$$

В расходной части учтём количество CO, исходя из доли металлизированных окатышей, и содержание реакционного углерода в них:

$$CO_{\text{газ}} = D_{\text{мо}} \cdot C_{\text{р}} \cdot \frac{280}{12} = 0,687 \cdot 1,98 \cdot \frac{280}{12} = 31,8.$$

При дожигании CO кислородом масса CO_2 будет равна: $G = CO_{\text{газ}} \cdot \frac{44}{28} = 50$, в том числе кислорода:

$$G_1 = G - CO_{\text{газ}} = 50 - 31,8 = 18,2.$$

При дожигании CO кислородом воздуха масса воздуха и дыма будет равна:

$$CO_2 = CO_{\text{газ}} \cdot \frac{44}{28} = 31,8 \cdot \frac{44}{28} = 50.$$

$$N_2 = CO_{\text{газ}} \cdot \frac{16 \cdot D_{N_2}}{28 \cdot D_{O_2}} = 31,8 \cdot \frac{16 \cdot 0,767}{28 \cdot 0,233} = 59,8,$$

где $D_{N_2} = 0,767$ – доля азота в воздухе,

$D_{O_2} = 0,233$ – доля кислорода в воздухе.

Дым: $D_m = CO_2 + N_2 = 50 + 59,8 = 109,8$.

Воздух: $W = G_1 + N_2 = 18,2 + 59,8 = 78$.

Результаты расчётов вносим в таблицу 4.4.

Таблица 4.4
Материальный баланс плавки

Приход	Варианты использования CO			Расход	Варианты использования CO		
	1	2	3		1	2	3
МОК 1-й сорт	687,60	687,60	687,60	сталь	1000	1000	1000
МОК 2-й сорт	0	0	0	шлак	138,43	138,43	138,43
скрап	350	350	350	газ	31,8043	49,9782	109,804
известь	66,255	66,255	66,255	пыль	33,524	33,524	33,524
электроды							
ф/сплавы	25,826	25,826	25,826				
футеровка	11,300	11,300	11,300				
кислород	0	18,173	18,173				
азот	0	0	59,825				
Всего	1141,9	1160,1	1219,9		1203,7	1221,9	1281,7
Невязка, %	5,1317	5,0554	4,8194				

Таким образом, расчёт материального баланса показал, что при использовании в шихте 65 % металлизированных окатышей и 35 % скрапа выход годного составит 88,3 %.

4.4. Варианты заданий

Варианты индивидуальных заданий и химический состав сталей приведены в таблицах 4.5 и 4.6.

Таблица 4.5
Индивидуальные задания

№ п/п	Марка стали	Доля скрапа
1	2	3
1	20	0,3
2	35Г2	0,6
1	2	3
3	ШХ15	0,5
4	X17H13M2T	0,25
5	08Ю	0,45
6	45	0,55
7	25ХГМ	0,65
8	60С2	0,7
9	Ст3сп	0,4
10	55С2	0,35

Таблица 4.6
Химический состав сталей

Марка стали	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	As	N	Cu	Al	Mo	Ti
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
20	0,17-0,24	0,17-0,37	0,35-0,65	≤0,040	≤0,035	≤0,25	≤0,30	≤0,08	≤0,008	≤0,30	-	-	-
35Г2	0,31-0,39	0,17-0,37	1,40-1,80	0,035	0,035	0,30	0,30	-	-	0,30	-	-	-
ШХ15	0,95-1,05	0,17-0,37	0,20-0,40	0,0200	0,027	1,30-1,65	0,30	-	-	0,25	-	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
55С2	0,52-0,60	≤0,10	≤2,00	0,035	0,035	0,30	0,25	-	-	0,20	-	-	-
X17H13M2T	≤0,10	≤0,80	≤2,00	≤0,020	≤0,035	16,0-18,0	12,0-14	-	-	-	-	2,00-3,00	0,70
Ст3сп	0,14-0,22	0,15-0,30	0,40-0,65	≤0,050	≤0,040	≤0,30	≤0,30	≤0,080	≤0,010	≤0,30	-	-	-
60С2	0,57-0,65	1,5-2,0	0,60-0,90	0,035	0,035	0,30	0,25	-	-	0,20	-	-	-
25ХГМ	0,23-0,29	0,17-0,37	0,90-1,20	≤0,035	≤0,035	≤0,90-1,2	≤0,30	-	-	≤0,30	-	0,20-0,30	-
45	0,42-0,50	0,017-0,37	0,50-0,80	0,04	0,035	0,25	0,25	0,08	-	0,25	-	-	-
08Ю	0,7	0,01	0,20-0,35	0,025	0,02	0,03	0,06	-	-	0,06	0,02-0,07	-	-

4.5. Контрольные вопросы

1. Что необходимо знать для определения массы ферросплавов?
2. Какие дополнительные элементы вносимые ферросплавом учитываются при расчёте массы ферросплава?
3. Что необходимо учитывать при расчёте доли

металлизированных окатышей и доли шлака?

4. Как производится расчёт количества и состава пыли, уносимой из печи?

5. Что учитывается при проверке баланса металла?

6. Что учитывается при проверке баланса кислорода?

7. С какой целью определяется количество содержания серы, фосфора и коэффициентов распределения между шлаком и металлом?

8. Что учитывается при проверке баланса углерода?

9. Что учитывается при расчёте материального баланса плавки ЖМО в ДСП?

10. С какой целью делается расчёт материального баланса ДСП?

4.6. Список литературы

1. Меркер Э.Э. Энергосбережение при электроплавке стали в дуговых печах / Э.Э. Меркер, Д.А. Харламов. – Старый Оскол: ТНТ, 2013. – 308 с.

2. Бартенева, О.И. Исследование теплоусвоения сталеплавильной ванны в дуговой печи / О.И. Бартенева, Э.Э. Меркер, Д.А. Харламов // Изв. ВУЗов, "Чёрная металлургия". — 2001. — № 5. — С. 74-76.

3. Гречко, А.В. Теплообмен между расплавом и гарнисажем в металлургических агрегатах / А.В. Гречко // "Металлы". — 1988. — № 5. — С. 9-19.

4. Лякишев, Н.П. Передача тепла от электрических дуг металлической ванне в дуговой печи / Н.П. Лякишев // Изв. ВУЗов, "Черная металлургия". — 1991. — № 3. — С. 29-31.

5. Флейшер, А.Г. Влияние температуры расплава на теплоотдачу к поверхности погруженного плавящегося тела / А.Г. Флейшер, А.Л. Кузьмин // Изв. ВУЗов, "Чёрная металлургия". — 1982. — № 4. — С. 40-43.

6. Сазонов, А.В. Особенности технологии электроплавки окатышей в дуговой печи / А.В. Сазонов, Э.Э. Меркер // Изв. ВУЗов, "Чёрная металлургия". — 2008. — № 2. — С. 31-33.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5

"РАСЧЁТ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗА ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ (DRI)"

5.1. Цель работы

Цель работы — научиться делать расчёт химического состава железа прямого восстановления (DRI). Узнать характеристики восстановленного железа и свойства исходной руды

5.2. Общие сведения

Продуктом прямого восстановления железной руды является пористое твёрдое железо прямого восстановления (DRI).

В общем форма DRI определяется восстанавливаемой рудой. Т.е. это будут окатыши, если восстанавливают окатыши, и это будут бесформенные тела, если восстанавливается кусковая руда. Форма может быть изменена только механическим способом, т.е. путём горячего брикетирования (HBI).

Качество DRI обычно определяют по величине степени металлизации (% M) и содержанию углерода (% C).

Степень металлизации DRI определяется как отношение между процентным содержанием металлического железа и процентным содержанием общего железа:

$$\%M = \frac{(\%Fe_{\text{металлические}}) \cdot 100\%}{(\% Fe_{\text{общее}})}. \quad (5.1)$$

Другими словами, качество определяется процентом железа в DRI, находящегося в металлической форме, от общего количества железа. Под металлическим железом понимается железо, находящееся собственно в металлическом виде, а также железо, связанное с углеродом в форме цементита (Fe_3C).

С экономической точки зрения в промышленных процессах прямого восстановления степень металлизации не доводится до 100 %; обычно она составляет 85...95 %.

Содержание углерода в DRI — это общее содержание углерода,

независимо в какой форме он находится: в виде соединения (Fe_3C = цементит) или в свободной форме (C = графит).

В соответствии с требованиями сталеплавильщиков, процессы прямого восстановления производят DRI с содержанием углерода от 1 до 3 %.

Есть и другой показатель, определяющий качество DRI и имеющий большое значение, т.к. он прямо связан со степенью металлизации и может использоваться как альтернативная форма определения качества. Этот показатель — степень восстановления, определяемый как отношение между отнятым кислородом и восстанавливаемым кислородом в исходной руде:

$$\%R = \frac{100\% \cdot (\text{отнятый кислород})}{0,430 \cdot \text{Fe}_{\text{общ}} - 0,143 \cdot \text{Fe}^{++} (\text{восстанавливаемый кислород})}$$

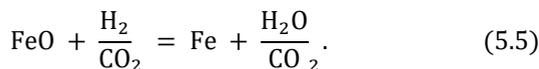
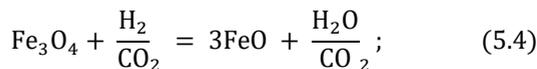
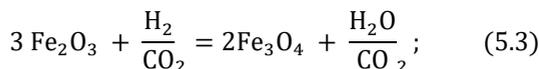
где $\text{Fe}^{++} = 0,7774 \cdot \text{FeO}$

или

$$\%R = \frac{(\text{O}_{\text{исх}} - \text{O}_{\text{кон}}) \cdot 100}{(\text{O}_{\text{исх}})} \quad (5.2)$$

Связь между % металлизации и % восстановления

Реакции восстановления железа при температуре выше 570 °С имеют вид:



Так как эти реакции идут последовательно, то можно сказать, что реакции (5.3) и (5.4) проходят раньше реакции (5.5), т.е. восстановление железа уже началось, кислород уже отнимается с

образованием воды и CO_2 , а металлизации ещё нет.

Опираясь на вышесказанное, экспериментальное изучение показало, что когда степень восстановления достигает значения 30...35 %, степень металлизации начинает расти от значения 0 %.

Можно заметить, что % M начинает расти, когда начинаются превращения по реакции (5.5); кроме того, % R продолжает расти, т.к. кислород продолжает удаляться и по этой реакции. Другими словами, % M и % R имеют прямо пропорциональную зависимость.

В связи с тем, что % R имеет определённое значение во время начала металлизации и эти оба параметра пропорциональны, можно заметить, что % R всегда выше % M для восстановления любых руд. Кроме того, и % R, и % M имеют одинаковое значение, когда превращения по реакции (5.5) полностью завершены, т.е. восстанавливаемый кислород полностью отнят, а всё железо в DRI находится в металлической форме; другими словами, и % R, и % M имеют равное значение, когда оба равны 100 %.

Практически соотношение между % M и % R, найденное экспериментально и включающее предыдущие комментарии, следующее:

$$\% M = 1,504 (\% R) - 50,242. \quad (5.6)$$

Рисунок 5.1 показывает график зависимости (5.6). Важно заметить, что соотношение между % M и % R имеет линейный характер, поэтому при значении R приблизительно 33 % значение % M будет равно 0.

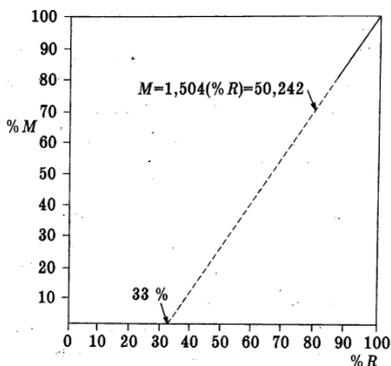


Рис. 5.1. Соотношение между степенью металлизации (% M) и степенью восстановления (% R)

Однако если провести материальный баланс между железной рудой и DRI, приняв, что весь оставшийся кислород в DRI находится в виде FeO, т.е. продукт (DRI) — не полностью восстановленный материал, то соотношение между металлизацией и восстановлением будет иметь вид:

$$M = \left(\frac{3}{2} - 0,5 \cdot \frac{Fe^{++}}{Fe_{общ}} \right) \cdot R - 50 \cdot \left(1 - \frac{Fe^{++}}{Fe_{общ}} \right), \quad (5.7)$$

где $Fe_{общ}$ и Fe^{++} — соответственно содержание железа общего и двухвалентного в исходной железной руде;

R и M — соответственно процент восстановления и металлизации.

5.3. Порядок и пример выполнения работы

Рассчитать химический состав железа прямого восстановления (DRI) при степени металлизации 92 % и содержании углерода 1,8 %, если в печь металлизации поступает руда с содержанием железа общего 68,15 % и пустой породы 2,69 %.

Решение.

Решение задачи строится на законе сохранения масс. Так как в процессе восстановления происходит удаление только кислорода, то масса пустой породы сохраняется. Кроме того, следует учесть приход углерода из восстановительного газа. Как правило, расчёты ведутся исходя из предположения (подтверждаемого практикой), что весь углерод находится в соединении с железом — Fe_3C . Выполним расчёт на 100 кг подаваемой руды в печь восстановления.

Исходя из условия задачи определяем массу поступающего с рудой кислорода:

$$O_2 = 100 - 68,15 - 2,69 = 29,16 \text{ (кг)}.$$

Из определения % металлизации:

$$\%M = \frac{(Fe_{\text{металлические}}) \cdot 100\%}{(Fe_{\text{общее}})} \text{ имеем:}$$

$$(Fe_{\text{металлические}}) = \frac{(Fe_{\text{общ}}) \cdot \%M}{100} \text{ и } (Fe_{\text{общ}}) = (Fe_{\text{мет}}) + (Fe \text{ в } FeO).$$

В $Fe_{\text{мет}}$ входит и железо в форме карбида (Fe_3C).

Для $Fe_{\text{мет}}$ имеем:

$$(Fe_{\text{мет}}) = (Fe_{\text{общ}}) - (Fe \text{ в } FeO).$$

Подставляя это в формулу для определения степени металлизации, получаем:

$$(Fe_{\text{общ}}) - (Fe \text{ в } FeO) = \frac{(Fe_{\text{общ}}) \cdot (\%M)}{100}.$$

Преобразуя:

$$(Fe_{\text{общ}}) - \frac{(Fe_{\text{общ}}) \cdot (\%M)}{100} = (Fe \text{ в } FeO)$$

или

$$\frac{(1 - \%M)}{100} \cdot (Fe_{\text{общ}}) = (Fe \text{ в } FeO).$$

Подставляя значения:

$$(1 - 0,92) \cdot 68,15 = Fe \text{ в } FeO \rightarrow Fe \text{ в } FeO = 5,45 \text{ (кг)},$$

и тогда:

$$FeO = 5,45 \times 71,847 = 7,01 \text{ (кг)},$$

где 71,847 — молекулярная масса FeO ,

55,847 — молекулярная масса Fe .

Тогда масса оставшегося кислорода в ДРИ:

$$O = 7,01 \cdot \frac{16}{71,847} = 1,56 \text{ (кг)}.$$

Обозначим через X суммарную массу всех компонентов DRI:

$$\frac{68,15 + 2,69 + 1,56 + 1,8 \cdot (X)}{100} = X,$$

$$72,40 = X - 0,018 \cdot X,$$

$$72,40 = X \cdot (1 - 0,018),$$

$$72,40 = X \cdot (0,982),$$

$$X = 73,73 \text{ (кг)}.$$

Тогда количество углерода:

$$0,018 \times 73,73 = 1,33.$$

Масса DRI:

$$68,15 + 2,694 - 1,56 + 1,33 = 73,73.$$

Тогда химический состав DRI:

$$Fe_{\text{общ}} = \frac{68,15 \cdot 100}{73,73} = 92,43 \text{ \%}.$$

$$O = \frac{1,56 \cdot 100}{73,73} = 2,12 \text{ \%},$$

$$C = \frac{1,33 \cdot 100}{73,73} = 1,80 \text{ \%}.$$

Пустая порода:

$$G = \frac{2,69 \cdot 100}{73,73} = 3,65 \text{ \%}.$$

Всего: 100,00 %.

Определим количество металлического железа:
из определения

$$Fe_{\text{общ}} = Fe_{\text{мет}} + Fe \text{ в } FeO,$$

$$Fe_{\text{мет}} = Fe_{\text{общ}} - Fe \text{ в } FeO$$

или

$$Fe_{\text{мет}} \text{ в DRI} = 68,15 - 5,45 = 62,70 \text{ (кг)}.$$

Состав DRI как функция $Fe_{\text{мет}}$ и $Fe \text{ в } FeO$:

$$62,70 + 5,45 + 2,69 + 1,33 = 73,73 \text{ (кг)},$$

$$Fe_{\text{мет}} = \frac{62,70 \cdot 100}{73,73} = 85,04 \%,$$

$$Fe \text{ в } FeO = \frac{5,45 \cdot 100}{73,73} = 7,39 \%,$$

$$O = \frac{7,39 \cdot 16}{55,847} = 2,12 \%.$$

Пустая порода:

$$G = 3,65 \%,$$

$$C = 1,80 \%.$$

Всего: 100,00 %

$$\% FeO \text{ в DRI} = \frac{7,39 \cdot 71,847}{55,847} = 9,51$$

Проверка:

$$\frac{\% M (Fe_{\text{мет}}) \cdot 100}{(Fe_{\text{общ}})} = \frac{85,04 \cdot 100}{92,43} = 92 \%.$$

Степень восстановления:

$$\% R = \frac{(O_{\text{исх}} - O_{\text{кон}}) \cdot 100}{(O_{\text{исх}})},$$

где $O_{\text{исх}}$ — содержание кислорода в исходной железной руде;
 $O_{\text{кон}}$ — содержание кислорода в DRI;

$$R = \frac{(29,16 - 1,56) \cdot 100}{29,16} = 94,65 \%$$

Результаты расчёта:

$$Fe_{\text{общ}} = 92,43 \%,$$

$$Fe_{\text{мет}} = 85,04 \%,$$

$$M = 92\%,$$

$$C = 1,8\%,$$

$$O = 2,12\%.$$

Пустая порода:

$$G = 3,65 \%,$$

$$R = 94,65 \%$$

Выход железа прямого восстановления — 0,7373 т/т.

Альтернативный метод расчёта химического состава DRI следующий: имея определённую степень восстановления, выявить степень металлизации при известном содержании углерода. Исходные данные по восстанавливаемой руде те же, что и в предыдущем примере. Задаваемая степень восстановления равна 92 %.

Расчёт выполним на 100 т подаваемой в печь руды. Используем определение степени восстановления:



$$\% R = \frac{(O_{\text{исх}} - O_{\text{кон}}) \cdot 100}{(O_{\text{исх}})},$$

Имеем для $O_{\text{кон}}$:

$$O_{\text{кон}} = O_{\text{исх}} \cdot \left(1 - \% \frac{R}{100}\right)$$

или

$$O_{\text{кон}} = 29,16 \cdot (1 - 0,92) = 2,33 \text{ (т)}.$$

Используя методологию предыдущего примера:

$$\frac{68,15 + 2,69 + 2,33 + 1,8 \cdot X}{100} = X \text{ (т)}$$

$$73,17 = X \cdot 0,982.$$

$$X = 74,51 \text{ (т)}.$$

Исходя из этого можно рассчитать $\% Fe_{\text{общ}}$ в DRI:

$$\frac{68,15 \cdot 100}{74,15} = 91,46 \text{ \%}.$$

Далее рассчитываем $Fe_{\text{мет}}$ и Fe в FeO :

$$O_{\text{кон}} = 2,33,$$

Тогда:

$$FeO = \frac{2,33 \cdot 71,847}{16} = 10,46,$$

$$Fe \text{ в } FeO = \frac{10,46 \cdot 55,847}{71,847} = 8,13.$$

Тогда:

$$Fe_{\text{мет}} = Fe_{\text{общ}} + Fe \text{ в } FeO$$

Экстракция чёрных металлов из природного и техногенного сырья

$$\text{или } Fe_{\text{общ}} = Fe_{\text{мет}} - Fe \text{ в } FeO$$

$$Fe_{\text{мет}} = 68,15 - 8,13 = 60,02,$$

$$\%Fe_{\text{мет}} = \frac{60,02 \cdot 100}{74,51} = 80,55,$$

$$\%Fe \text{ в } FeO = \frac{8,13 \cdot 100}{74,51} = 10,91,$$

$$Fe_{\text{общ}} = 80,55 + 10,91 = 91,46\%.$$

Таким образом:

$$M = \frac{80,55 \cdot 100}{91,46} = 88,07\%,$$

$$O = \frac{2,33 \cdot 100}{74,51} = 3,13\%$$

Пустая порода:

$$G = \frac{2,69 \cdot 100}{74,51} = 3,61,$$

$$C = 1,80\%.$$

$$\text{Итого: } 100\%.$$

5.4. Варианты заданий

Вариант 1.

Рассчитать химический состав железа прямого восстановления (DRI) при степени металлизации 93 % и содержании углерода 1,5 %, если в печь металлизации поступают офлюсованные окатыши с содержанием железа общего 66,75 % и FeO — 0,7 %.

Вариант 2.

Рассчитать химический состав железа прямого восстановления (DRI) при степени восстановления 94 % и содержании углерода 1,8 %, если в печь металлизации поступают офлюсованные окатыши с

содержанием железа общего 67,15 % и FeO — 0,3 %.

Вариант 3.

Рассчитать химический состав железа прямого восстановления (DRI) при степени металлизации 95 % и содержании углерода 1,9 %, если в печь металлизации поступает руда с содержанием железа общего 67,15 % и пустой породы 2,59 %.

Вариант 4.

Рассчитать химический состав железа прямого восстановления (DRI) при степени металлизации 92 % и содержании углерода 1,7 %, если в печь металлизации поступает руда с содержанием железа общего 68,15 % и пустой породы 2,89 %.

Вариант 5.

Рассчитать химический состав железа прямого восстановления (DRI) при степени металлизации 96 % и содержании углерода 1,6 %, если в печь металлизации поступает руда с содержанием железа общего 69,15 % и пустой породы 2,79 %.

Вариант 6.

Рассчитать химический состав железа прямого восстановления (DRI) при степени металлизации 93 % и содержании углерода 1,5 %, если в печь металлизации поступает руда с содержанием железа общего 65,15 % и пустой породы 2,79 %.

Вариант 7.

Рассчитать химический состав железа прямого восстановления (DRI) при степени металлизации 97 % и содержании углерода 1,4 %, если в печь металлизации поступает руда с содержанием железа общего 70,15 % и пустой породы 2,99 %.

Вариант 8.

Рассчитать химический состав железа прямого восстановления (DRI) при степени металлизации 94 % и содержании углерода 1,6 %, если в печь металлизации поступают офлюсованные окатыши с содержанием железа общего 65,75 % и FeO — 0,8 %.

Вариант 9.

Рассчитать химический состав железа прямого восстановления (DRI) при степени металлизации 91 % и содержании углерода 1,4 %, если в печь металлизации поступают офлюсованные окатыши с содержанием железа общего 67,75 % и FeO — 0,6 %.

Вариант 10.

Рассчитать химический состав железа прямого восстановления

(DRI) при степени металлизации 90 % и содержании углерода 1,3 %, если в печь металлизации поступают офлюсованные окатыши с содержанием железа общего 68,75 % и FeO — 0,5 %.

5.5. Контрольные вопросы

1. Что является продуктом прямого восстановления железной руды?
2. Чем определяется форма DRI?
3. Каким способом может быть изменена форма DRI?
4. По какой величине определяют качество DRI?
5. Почему степень металлизации не доводят до 100%?
6. Как определяется степень металлизации DRI?
7. Что такое содержание углерода в DRI?
8. С каким содержанием углерода в соответствии с требованиями сталеплавильщиков производят DRI?
9. Какой показатель имеет большое значение при определении качества DRI?
10. Из каких компонентов состоит DRI при степени металлизации более 85%?

5.6. Список литературы

1. Юсфин, Ю. С. Металлургия железа [Текст]: учебник для вузов / Ю. С. Юсфин, Н. Ф. Пашков. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. – 464 с.
2. Шилаев, В. П. Основы обогащения полезных ископаемых [Текст]: учебное пособие / В. П. Шилаев. – М.: Недра, 1986. – 296 с.
3. Тимофеева, А. С. Экстракция чёрных металлов из природного и техногенного сырья [Текст] / А. С. Тимофеева, Т. В. Никитченко, Е. С. Тимофеева. – Старый Оскол: ООО "ТНТ", 2017. – 303 с.

ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6

"РАСЧЁТ СОСТАВА ГОРНОВОГО ГАЗА"

6.1. Цель работы

Цель работы — научиться делать расчёт состава горнового газа.

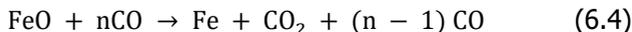
6.2. Общие сведения

Шихтовые материалы, загружаемые в доменную печь, нагреваются за счёт высокой температуры проходящих сквозь них газов. При этом из кокса удаляются влага и летучие вещества, карбонаты разлагаются, происходит восстановление оксидов различных элементов.

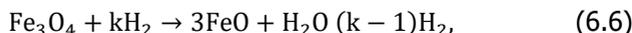
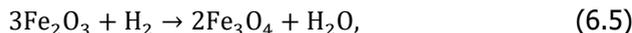
В доменную печь карбонаты попадают в виде известняка — CaCO_3 , доломита — $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ карбонатов марганца — MnCO_3 . В общем виде реакция разложения карбонатов:

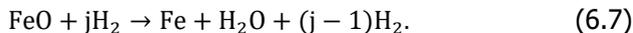


В условиях доменной печи в основном восстанавливаются оксиды железа и некоторое количество оксидов Si, Mn, P. Восстановителями являются газы CO и H_2 , также твёрдый углерод. Восстановление с помощью газообразных восстановителей называется косвенным восстановлением. При температуре более 570 °C восстановление идёт в три ступени: оксидом углерода:



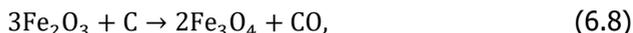
Водородом:





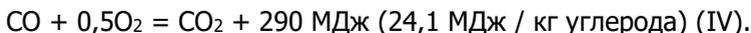
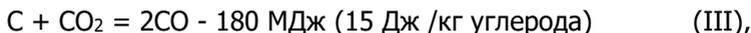
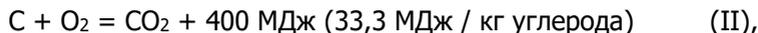
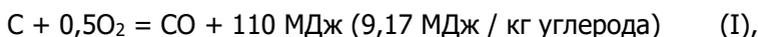
В этих уравнениях m , n , k , j — зависящие от температуры коэффициенты, характеризующие необходимый избыток восстановителя для течения реакций в указанном направлении. Их можно определить по диаграммам равновесных газовых смесей для соответствующих реакций.

Восстановление с использованием твёрдого углерода называется прямым восстановлением:



Восстановление с использованием твёрдого углерода обогащает газовую фазу оксидом углерода, который затем может участвовать в восстановлении оксидов, железа.

Одним из основных процессов, происходящих в горне, является процесс горения кокса в дутье, подаваемом через воздушные фурмы. Так как кокс содержит $\approx 90\%$ углерода, процесс горения кокса можно рассматривать как реакцию окисления углерода. Окислителем в дутье является кислород. В системе, состоящей из углерода и кислорода, могут протекать следующие реакции:



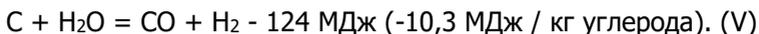
Реакции (I)-(III) являются гетерогенными и поэтому имеют меньшую скорость протекания, чем гомогенная реакция (IV). Все реакции (I)-(IV) идут в зоне горения кокса в определённой последовательности, обусловленной их термодинамическими и кинетическими характеристиками.

У среза фурмы (на выходе из неё сухого атмосферного дутья в

горн) начнут протекать реакции (I) и (II). При наличии свободного кислорода продукт реакции (I) - CO — по реакции (IV), будет окисляться до CO₂. Продукт реакции (II) - CO₂ — по реакции (III), взаимодействуя с C, будет восстанавливаться до CO, но при наличии свободного кислорода быстрее идущая реакция (IV) вновь окислит CO до CO₂. Таким образом, газовая фаза будет состоять из азота, некоторого количества CO₂ и оставшегося кислорода. По мере продвижения по радиусу горна к центру печи количество CO₂ будет увеличиваться (за счёт прохождения указанных реакций), а количество кислорода будет соответственно уменьшаться. Очевидно, суммарное содержание O₂ и CO₂ будет оставаться постоянным (т.к. при реакции 1 моля O₂ образуется 1 моль CO₂). Рассмотренные процессы будут идти до полного расходования кислорода. Газовая фаза при исчезновении кислорода будет состоять из N₂ и CO₂.

При дальнейшем перемещении к центру горна CO₂ — являющийся окислителем — будет реагировать с углеродом по реакции (III). Реагируя с углеродом, 1 моль CO₂ даёт 2 моля CO. Поэтому общий объём газа будет возрастать. Состав газовой фазы (в %) будет изменяться следующим образом: содержание CO₂ — уменьшаться, содержание CO — возрастать, содержание N₂ — уменьшаться (за счёт роста объёма газа). Конечным результатом процессов будет полное исчезновение из газовой фазы CO₂, замещённой CO, т.е. газовая фаза будет состоять из N₂ и CO.

Дутьё всегда содержит небольшое количество паров влаги (за счёт естественной влажности), которая является окислителем для углерода:



Исследования показали, что реакция (V) начинается в отдалении от среза фурмы, примерно там, где исчезает свободный кислород. Реакция (V) протекает медленнее, чем реакция (III) окисления углерода диоксидом CO₂. Поэтому, после исчезновения из газовой фазы CO₂, окисление углерода будет продолжаться парами влаги. Газовая фаза при этом будет обогащаться H₂ и CO, общий объём газа будет возрастать, т.к. по реакции (V) 1 моль паров H₂O, реагируя с твёрдым углеродом даёт 2 моля газообразных продуктов (H₂ и CO). Поэтому содержание H₂ и CO будет расти, а содержание N₂

— уменьшаться. После исчезновения паров воды горновой газ будет состоять из N_2 , H_2 и CO . При дальнейшем перемещении к центру горна изменения состава горнового газа будут незначительными, обусловленными взаимодействием его с шихтой и продуктами плавки (рис. 6.1).

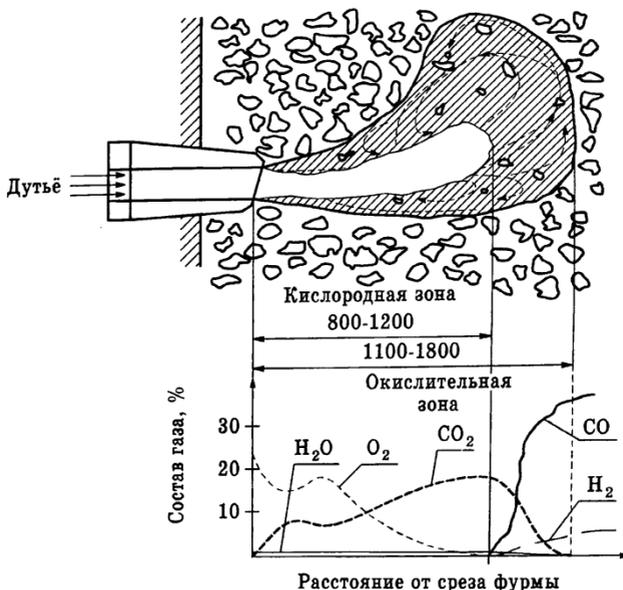


Рис. 6.1. Расположение зон горения кокса в горне печи и изменение состава фурменного газа

Зона (т.е. некоторый объём в горне печи), в которой присутствуют газы окислители углерода, называется окислительной зоной. Она состоит из двух частей:

- внутренней, или кислородной зоны, т.е. той части, в которой в свободном виде присутствует кислород $>1\%$ (и, конечно, CO_2 и H_2O);
- внешней части — в которой в свободном виде встречаются CO_2 или $H_2O >2\%$, а O_2 — нет.

Под термином фурменный газ понимают газ в окислительной зоне, под термином горновой газ — газ вне окислительной зоны.

Расчёт состава выполняют, как правило, для горнового газа.

Количество дутья ($V'_д$), необходимое для сжигания 1кг углерода (из кокса) у фурм до получения горнового газа, рассчитывается по формуле:

$$V'_д = \frac{0,933}{\omega + 0,5\varphi}, \quad (6.11)$$

где ω — содержание кислорода в дутье, $\text{нм}^3 \text{O}_2 / \text{нм}^3$ сухого дутья (можно считать, что это — процентное содержание кислорода, умноженное на 0,01);

φ — влажность дутья, $\text{нм}^3 \text{H}_2\text{O} / \text{нм}^3$ сухого дутья (можно считать, что это — процентное содержание влаги, умноженное на 0,01).

Размерность величины $V'_д$ — $\text{м}^3/(\text{кг } \text{C}_\text{ф})$. Под $\text{C}_\text{ф}$ понимают углерод кокса, сгорающий в окислительной зоне за счёт кислорода дутья.

Количества CO , H_2 и N_2 ($\text{м}^3/\text{кг } \text{C}_\text{ф}$), образовавшиеся при горении углерода кокса, рассчитываются по формулам:

$$V'_{\text{CO}} = \frac{22,4}{12} = 1,8667; \quad (6.12)$$

$$V'_{\text{H}_2} = V'_д \cdot \varphi, \quad (6.13)$$

$$V'_{\text{N}_2} = V'_д \cdot (1 - \omega). \quad (6.14)$$

Объем образовавшегося горнового газа — $V'_г$ ($\text{м}^3/\text{кг } \text{C}_\text{ф}$), это сумма объёмов CO , H_2 и N_2 :

$$V'_г = \frac{22,4}{12} + V'_д \cdot (1 - \omega + \varphi) = \frac{22,4}{12} \cdot \frac{1 + \omega + 2\varphi}{2\omega + \varphi}. \quad (6.15)$$

Исходя из приведённых формул, можно определить состав горнового газа, %:

$$\text{CO} = \frac{V'_{\text{CO}}}{V'_г} \cdot 100; \quad (6.16)$$

$$N_2 = \frac{V'_{N_2}}{V'_r} \cdot 100; \quad (6.17)$$

$$H_2 = \frac{V'_{H_2}}{V'_r} \cdot 100. \quad (6.18)$$

6.3. Порядок и пример выполнения работы

Определить состав горнового газа при содержании кислорода в дутье 27%, влажности дутья 2 %, расходе природного газа $D = 0,06$, содержащего $CO_2 = 0,2 \%$, $CH_4 = 95,1 \%$, $N_2 = 0,5 \%$, $C_2H_6 = 2,3 \%$, $C_3H_8 = 0,7 \%$, $C_4H_{10} = 0,4 \%$ и $C_5H_{12} = 0,8 \%$.

Решение.

Горновой газ соответствует неполному горению кокса и дополнительного топлива в фурменных очагах до CO и H_2 .

Определяем суммарное содержание «газообразного» углерода во вдуваемом газе:

Определяем содержание кислорода во вдуваемом газе:

$$\begin{aligned} C &= CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_4 + 2C_2H_6 + \\ &+ 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12} = \\ &= 0,002 + 0,951 + 2 \cdot 0,023 + 3 \cdot 0,007 + 4 \cdot 0,004 + 5 \cdot 0,008 = \\ &= 1,076 \frac{M^3}{M^3}. \end{aligned}$$

Определяем количество водорода, азота, оксида углерода и общий выход горнового газа:

Определяем содержание водорода во вдуваемом газе:

$$\begin{aligned} H &= H_2O + H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_8 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12} = \\ &= 2 \cdot 0,951 + 3 \cdot 0,023 + 4 \cdot 0,007 + 5 \cdot 0,004 + 6 \cdot 0,008 = \\ &= 2,067 \frac{M^3}{M^3} \end{aligned}$$

Определяем содержание кислорода во вдуваемом газе:

$$O = O_2 + CO_2 + 0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2O = 0,002 \frac{M^3}{M^3}$$

Определяем количество водорода, азота, оксида углерода и общий выход горнового газа:

$$\begin{aligned} V_{CO} &= V_d [2 \cdot \omega + \varphi + 2D(\bar{O})] = V_d [2 \cdot 0,27 + 0,02 + 2 \cdot 0,06 \cdot 0,002] = \\ &= 0,56024V_d, M^3 \end{aligned}$$

$$V_{H_2} = V_d [\varphi + D(\bar{O})] = V_d [0,02 + 0,06 \cdot 2,067] = 0,14402V_d, M^3$$

$$V_{N_2} = V_d [1 - \omega + D(\bar{O})] = V_d [1 - 0,27 + 0,06 \cdot 0,0005] = 0,7303V_d, M^3$$

$$V_{\Gamma} = V_{CO} + V_{H_2} + V_{N_2} = V_d (0,56024 + 0,14402 + 0,7303) = 1,43456V_d, M^3$$

Тогда содержание оксида углерода в горновом газе:

$$\%CO_2 = \frac{100 \cdot V_{CO}}{V_{\Gamma}} = \frac{100 \cdot V_d \cdot 0,56024}{V_d \cdot 1,43456} = 39,05\%$$

Содержание водорода:

$$\%H_2 = \frac{100 \cdot V_{H_2}}{V_{\Gamma}} = \frac{100 \cdot V_d \cdot 0,14402}{V_d \cdot 1,43456} = 10,04\%$$

Содержание азота:

$$\%N_2 = \frac{100 \cdot V_{N_2}}{V_{\Gamma}} = \frac{100 \cdot V_d \cdot 0,7303}{V_d \cdot 1,43456} = 50,91\%$$

В сумме содержание в газе CO, H₂ и N₂ должно составлять 100 %

$$(CO + N_2 + H_2) = 39,05 + 10,04 + 50,91 = 100 \%$$

6.4. Варианты заданий

Вариант 1.

Определить состав горнового газа по условию задачи (по примеру), но при $\omega = 0,25; 0,30$ и $0,35$ сухого дутья. Построить график изменения содержания CO , H_2 и N_2 в горновом газе при изменении содержания кислорода в дутье.

Вариант 2.

Определить состав горнового газа по условиям решённой задачи, но при $D = 0,04; 0,07$ и $0,1$. Построить график изменения содержания CO , H_2 и N_2 в горновом газе при изменении расхода природного газа.

Вариант 3.

Определить состав горнового газа по условиям решённой задачи, но при $\varphi = 0,01; 0,015$ и $0,025$. Построить график изменения содержания CO , H_2 и N_2 в горновом газе при изменении влажности дутья.

Вариант 4.

Определить состав горнового газа по условиям задачи (по примеру), но при использовании а) 100 % CH_4 , б) 90 % CH_4 и 10 % C_2H_6 , в) 80 % CH_4 и 20 % C_2H_6 . Построить график изменения содержания CO , H_2 и N_2 в горновом газе в зависимости от доли CH_4 в нём.

Вариант 5.

Определить состав горнового газа при содержании кислорода в дутье 29%, влажности дутья 4 %, расходе природного газа $D = 0,08$, содержащего $\text{CO}_2 = 0,4$ %, $\text{CH}_4 = 93,1$ %, $\text{N}_2 = 0,5$ %, $\text{C}_2\text{H}_6 = 4,3$ %, $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,7$ %, $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,4$ % и $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,6$ %.

Вариант 6.

Определить состав горнового газа по условиям решённой задачи, но при $D = 0,03; 0,05$ и $0,07$. Построить график изменения содержания CO , H_2 и N_2 в горновом газе при изменении расхода природного газа.

Вариант 7.

Определить состав горнового газа по условиям решённой задачи, но при $\varphi = 0,015; 0,01$ и $0,02$. Построить график изменения содержания CO , H_2 и N_2 в горновом газе при изменении влажности дутья.



Вариант 8.

Определить состав горнового газа по условию задачи (по примеру), но при $\omega = 0,15; 0,25$ и $0,30$ сухого дутья. Построить график изменения содержания CO , H_2 и N_2 в горновом газе при изменении содержания кислорода в дутье.

Вариант 9.

Определить состав горнового газа по условиям задачи (по примеру), но при использовании а) 100 % CH_4 , б) 80 % CH_4 и 20 % C_2H_6 , в) 70 % CH_4 и 30 % C_2H_6 . Построить график изменения содержания CO , H_2 и N_2 в горновом газе в зависимости от доли CH_4 в нём.

Вариант 10.

Определить состав горнового газа при содержании кислорода в дутье 29%, влажности дутья 4 %, расходе природного газа $D = 0,08$, содержащего $\text{CO}_2 = 0,5$ %, $\text{CH}_4 = 91,3$ %, $\text{N}_2 = 0,5$ %, $\text{C}_2\text{H}_6 = 6,3$ %, $\text{C}_3\text{H}_8 = 0,7$ %, $\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,3$ % и $\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,5$ %.

6.5. Контрольные вопросы

1. В доменную печь карбонаты попадают в виде?
2. Что называется косвенным восстановлением?
3. Какие газы являются восстановителями в доменной печи?
4. Чем обогащает газовую фазу при восстановлении твердый углерод?
5. Кем является кислород в дутье?
6. Кем является небольшое количество паров влаги при дутье?
7. Из каких частей состоит окислительная зона в горне печи?
8. Что понимается под термином фурменный газ?
9. Что понимается под термином горновой газ?
10. Какие газы входят в объем горнового газа?

6.6. Список литературы

1. Юсфин, Ю. С. Металлургия железа [Текст]: учебник для вузов / Ю. С. Юсфин, Н. Ф. Пашков. – М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. – 464 с.
2. Шилаев, В. П. Основы обогащения полезных ископаемых [Текст]: учебное пособие / В. П. Шилаев. – М.: Недра, 1986. – 296 с.
3. Тимофеева, А. С. Экстракция чёрных металлов из природного и техногенного сырья [Текст] / А. С. Тимофеева, Т. В. Никитченко, Е.



С, Тимофеева. – Старый Оскол: ООО "ТНТ", 2017. – 303 с.