

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
НОВОТРОИЦКИЙ ФИЛИАЛ

---

Кафедра технологии и оборудования металлургии

---

**Е.В. Братковский**

**РАСЧЕТ СОСТАВА ШИХТЫ, МАТЕРИАЛЬНОГО И ТЕПЛОВОГО  
БАЛАНСОВ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА**

Методические указания  
для выполнения курсовой работы по дисциплинам  
«Теория и технология окискования сырья и доменного производства»,  
«Экстракция черных металлов из природного сырья»  
для студентов, обучающихся по направлению  
подготовки бакалавров 22.03.02 Металлургия,  
профиль «Металлургия черных металлов»,  
всех форм обучения

Новотроицк - 2020

УДК 669.162  
ББК 34.327  
Б 87

## Рецензенты

*Начальник управления технического сопровождения сталеплавильного производства  
АО «Уральская Сталь», к.т.н., М.С. Кузнецов*

*Доцент кафедры металлургических технологий и оборудования Новотроицкого  
филиала НИТУ «МИСиС», к.т.н., Д.Р. Ганин*

Братковский Е.В. Расчет состава шихты, материального и теплового балансов доменного процесса: методические указания для выполнения курсовой работы для студентов направления подготовки 22.03.02 Металлургия. – Новотроицк: НФ НИТУ «МИСиС», 2020. – 61 с.

Методические указания предназначены для выполнения курсовой работы, предусмотренной учебным планом подготовки бакалавров направления 22.03.02 Металлургия (профиль «Металлургия черных металлов») по дисциплинам «Теория и технология окискования сырья и доменного производства» и «Экстракция черных металлов из природного сырья».

Целью выполнения курсовой работы является привитие студентам навыков решения вопросов, связанных, с расчетами шихты, материального и теплового балансов доменного процесса, а также закрепления знаний в области доменного производства и подготовки руд к плавке.

Приведена методика расчет состава шихты, материального и теплового балансов доменного процесса, а также требования к оформлению курсовой работы.

Указания составлены в соответствии с требованиями ОС ВО НИТУ «МИСиС» для бакалавров направления подготовки 22.03.02 Металлургия, обучающихся в НФ НИТУ «МИСиС».

*Рекомендовано Методическим советом НФ НИТУ «МИСиС»*

© Новотроицкий филиал  
ФГАОУ ВО «Национальный  
исследовательский технологический  
университет «МИСиС», 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ПРИМЕРНЫЙ РАСЧЁТ ШИХТЫ .....	5
1.1 Исходные данные .....	5
1.2 Расчёт состава доменной шихты (за исключением кокса) .....	7
1.2.1 Определяется средний состав железорудных материалов.....	7
1.2.2 Выход чугуна из компонентов шихты .....	7
1.2.3 Балансу марганца в компонентах шихты.....	8
1.2.4 Баланс основных и кислотных оксидов при заданной .....	9
основности шлака.....	9
1.3 Расчет расхода кокса .....	10
1.3.1 Понятие о тепловых эквивалентах .....	10
1.3.2 Расчет тепловых эквивалентов элементов и соединений.....	11
1.3.3 Расчет тепловых эквивалентов компонентов доменной шихты и .....	18
дополнительного топлива.....	18
1.4 Определение удельного расхода компонентов шихты и.....	25
состава шлака, проверка состава чугуна и основности шлака.....	25
1.4.1 Расход компонентов шихты .....	25
1.4.2 Расчет состава шлака, проверка состава чугуна и .....	26
основности шлака.....	26
1.4.3 Определение температуры плавления шлака и его вязкости .....	27
2 РАСЧЁТ СОСТАВА И КОЛИЧЕСТВА КОЛОШНИКОВОГО ГАЗА И ДУТЬЯ .....	28
2.1 Баланс углерода .....	28
2.2 Расчет количества дутья .....	29
2.3 Количество и состав колошникового газа.....	30
3 РАСЧЕТ МАТЕРИАЛЬНОГО И ТЕПЛОВОГО БАЛАНСОВ ДОМЕННОЙ .....	36
ПЛАВКИ.....	36
3.1 Материальный баланс доменной плавки.....	36
3.2 Тепловой баланс доменной плавки.....	37
3.2.1 Приход тепла .....	37
3.2.2 Расход тепла.....	38
3.2.3 Показатели тепловой работы доменной печи .....	44
4 УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....	46
4.1 Общие требования к оформлению .....	46
4.2 Нумерация .....	46
4.3 Таблицы .....	47
4.4 Формулы и уравнения .....	49
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	51
ПРИЛОЖЕНИЕ А – ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА.....	52
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ .....	56
ПРИЛОЖЕНИЕ В – ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ШЛАКОВЫХ СИСТЕМ.....	58

## ВВЕДЕНИЕ

Расчеты расхода компонентов шихты проводят различными способами. Научную базу для расчетов заложили работы А.Н. Рамма, который впервые объединил в одних уравнениях материальные и тепловые показатели и ввел понятие тепловых эквивалентов материалов. Расчеты по методу Рамма широко используют в проектных и исследовательских разработках.

А.Н. Похвиснев упростил методику А.Н. Рамма, сделав ее пригодной для единичных вычислений. Эта методика приводится в курсовой работе.

Расчеты шихты проводятся обычно при замене в шихте одних материалов другими, при переводе печи на выплавку другого вида чугуна, при проектировании новых печей.

Расчет выполняется на единицу чугуна. При вводе в шихту нескольких сортов руд или их заменителей, соотношение между ними устанавливается из условия обеспечения необходимого содержания железа или других составляющих в смеси.

При расчете материального баланса достаточно данных, полученных при расчете шихты. Баланс должен сходиться с весьма малой невязкой.

При расчете теплового баланса определяется количество тепла, образующегося в печи в результате протекания тех или иных процессов и тепла, теряемого с колошниковой пылью и газом, охлаждающей водой и во внешнее пространство.

По данным теплового баланса вычисляется тепловой коэффициент полезного действия доменной печи и тепловой коэффициент использования углерода.

Исходные и справочные данные для выполнения курсовой работы следует брать из таблиц приложения А. Номер варианта соответствует номеру студента в алфавитном списке группы.

# 1 ПРИМЕРНЫЙ РАСЧЁТ ШИХТЫ

## 1.1 Исходные данные

Расчёт шихты проводится на 1 т чугуна.

Исходные данные для расчёта в соответствии с вариантом приведены в приложении А.

1. Для примерного расчета шихты состав чугуна представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Состав чугуна

Содержание элементов, %					
Si	Mn	P	S	C	Fe
0,6	0,6	≤0,1	≤0,04	4,06	94,6

2. Железорудная часть шихты состоит из 50% офлюсованного агломерата и 50% неофлюсованных окатышей.

Таблица 2 – Состав материалов

Содержание, %	Материал			Кокс	Рудная смесь
	Агломерат	Окатыши	Зола кокса		
Fe	53,25	61,94	15,63	1,63	57,60
Mn	0,23	0,43	1,02	0,11	0,33
S	0,048	0,036	1,692	0,176	0,042
P	0,031	0,026	0,459	0,048	0,028
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	63,58	84,60	22,33	2,32	74,09
FeO	11,24	3,50			7,37
Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>			1,42	0,15	
MnO	0,30	0,56			0,43
SiO <sub>2</sub>	10,40	5,84	40,90	4,25	8,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,06	2,25	24,30	2,53	1,66
CaO	11,58	3,56	2,60	0,27	7,57
MgO	1,82	0,44	1,64	0,17	1,13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,070	0,060	1,050	0,11	0,065
FeS	0,065	0,055			0,060
SO <sub>3</sub>	0,060	0,040	4,250	0,44	0,050
H <sub>2</sub> O	0,60	0,70			0,65

3. Состав марганцевой руды, флюса и кокса приведен ниже, состав золы кокса и пересчет ее в состав кокса представлен в таблице 2.

Таблица 3 – Химический состав марганцевой руды

Содержание, %							
Fe	Mn	S	P	MnO	MnO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
2,94	34,82	0,28	0,04	3,50	50,80	4,20	24,10
Содержание, %							
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	п.п.п.	H <sub>2</sub> O	
4,00	4,10	1,50	0,70	0,10	7,00	6,00	

Таблица 4 – Химический состав известняка

Содержание, %										
Fe	S	P	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
0,42	0,01	0,01	38,50	12,60	1,20	1,10	0,60	0,03	0,03	45,9

Таблица 5 – Состав кокса и летучих

Содержание, %				
Состав кокса				
Зола A <sup>c</sup>	Сера S <sup>c</sup>	Летучие	Углерод C <sup>c</sup>	H <sub>2</sub> O <sub>гигр</sub>
10,4	1,76	1,0	86,21	2,0
Состав летучих кокса				
CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
29,0	34,0	1,0	4,0	32,0

4. В качестве дополнительного топлива используется природный газ. Расход природного газа 120 м<sup>3</sup>/чугуна.

Таблица 6 – Состав природного газа

CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
90,0	3,0	1,0	1,0	5,0

5. Условия доменной плавки.

- а) Основность доменного шлака 1,1.
- б) Температура горячего дутья 1200 °С.
- в) Состав сухого дутья: содержание кислорода в дутье  $\omega = 0,24$ ; содержание азота  $(1 - \omega) = 0,76$ .
- г) Влажность дутья  $f = 1\%$  (по объему).
- д) Степень развития прямого восстановления  $r_d = 0,35$ .
- е) Степень использования восстановительной способности водорода 0,3-0,5. В расчете принята  $\eta_{H_2} = 0,4$ .
- ж) Температура отходящих газов 300 °С.
- з) Энтальпия чугуна ориентировочно определяется по следующим формулам:

$$Q_{\text{чугуна}} = 147 + 0,756 \cdot t - \text{для перепельного чугуна,}$$

$$Q_{\text{чугуна}} = (21 + 0,903 \cdot t) - \text{для литейного чугуна,}$$

где  $t$  – температура чугуна, составляющая 1400-1450 °С – для перепельного чугуна и 1450-1500 °С – для литейного чугуна (в расчете температура чугуна на выпуске 1400 °С).

Тогда  $Q_{\text{чугуна}} = 147 + 0,756 \cdot 1400 = 1205,4$  кДж.

и) Энтальпия шлака определяется по формуле

$$Q_{\text{шлака}} = 1459,5 + 2,1 \cdot (t - 1300) - \text{при } t_{\text{пл}} \text{ шлака} = 1300-1450 \text{ °С,}$$

$$Q_{\text{шлака}} = 1774,5 + 1,68 \cdot (t - 1450) - \text{при } t_{\text{пл}} \text{ шлака} > 1450 \text{ °С.}$$

где  $t$  – температура шлака (1415 °С).

Тогда  $Q_{\text{шлака}} = 1459,5 + 2,1 \cdot (1415 - 1300) = 1700$  кДж.

к) Тепловые потери включают: тепло, унесенное охлаждающей водой, тепловые потери через стены доменной печи лучеиспусканием и конвекцией. Величина тепловых потерь от 1260 до 2100 кДж/кг  $C_{\text{кокса}}$ . В расчете принято 1260 кДж/кг  $C_{\text{кокса}}$ .

л) Вынос рудной смеси с колошниковыми газами 2%, вынос кокса – 1%.

м) На образование метана расходуется  $[C]_{\text{CH}_4} = 0,8\%$  углерода кокса.

## 1.2 Расчёт состава доменной шихты (за исключением кокса)

### 1.2.1 Определяется средний состав железорудных материалов

Средний состав железорудной смеси определяется по формуле

$$[\text{Э}]_{\text{р.с.}} = [\text{Э}]_{\text{агл}} \cdot \eta_{\text{агл}} + [\text{Э}]_{\text{окат}} \cdot \eta_{\text{окат}},$$

где  $\eta_{\text{агл}}$  и  $\eta_{\text{окат}}$  – доля агломерата и окатышей в шихте.

Результаты расчета приведены в таблице 2.

Далее определяются расходы железорудной части шихты, флюса, марганцевой руды на 1 т выплавляемого чугуна. Расчет расходных коэффициентов шихты ведут по балансовым уравнениям. Обозначаются через  $x$ ,  $y$  и  $z$  расходы рудной смеси, марганцевой руды и известняка.

### 1.2.2 Выход чугуна из компонентов шихты

Выход чугуна – это величина, характеризующая количество чугуна при плавке единицы данного материала. Выход чугуна определяется по элементам, содержание которых в чугуне зависит лишь от их содержания в шихте (Fe, Mn, P, As, Ni, Cu, Cr, V и др.). Содержание других элементов определяется условиями плавки (C, Si, S, Ti).

Элементы, находящиеся в шихтовых материалах, в ходе доменной плавки распределяются между чугуном, шлаком и газом. Коэффициенты распределения зависят от условий плавки и связаны с сортом выплавляемого чугуна (приложение Б1).

Выход чугуна определяется по формуле:

$$\text{Ч} = \frac{\text{Fe} \cdot \eta_{\text{Fe}} + \text{Mn} \cdot \eta_{\text{Mn}} + \text{P} \cdot \eta_{\text{P}}}{100 - [\text{Si}] - [\text{C}] - [\text{S}]} = \frac{\text{A}}{100 - \text{B}},$$

где Fe, Mn, P – содержание соответствующих элементов в данном материале;  
 $\eta_{\text{Fe}}$ ,  $\eta_{\text{Mn}}$ ,  $\eta_{\text{P}}$  – коэффициенты перехода элементов в чугун, доли единиц;  
 [Si], [C], [S] – содержание соответствующих элементов в чугуне.

Результаты расчетов сведены в таблицу 7.

Таблица 7 – Определение выхода чугуна из материалов шихты

Параметр	Рудная смесь	Марганцевая руда	Известняк	Кокс
Fe, %	57,597	2,940	0,420	1,630
Fe · $\eta_{\text{Fe}}$	57,309	2,925	0,418	1,622
Mn, %	0,333	34,818		0,110
Mn · $\eta_{\text{Mn}}$	0,183	19,150		0,061
P, %	0,028	0,044	0,013	0,550
P · $\eta_{\text{P}}$	0,028	0,044	0,013	0,048
A	57,521	22,119	0,431	1,730
B	4,700			
Ч	0,6036	0,2212	0,0043	0,0173

При наличии других элементов, переходящих в чугун, делаются соответствующие дополнения в числителе этого выражения.

Уравнение по выходу чугуна из компонентов шихты имеет вид

$$\text{Ч}_{\text{р.с.}} \cdot x + \text{Ч}_{\text{м.р.}} \cdot y + \text{Ч}_{\text{изв.}} \cdot z = 1000,$$

$$0,6036x + 0,2212y + 0,0043z = 1000.$$

### 1.2.3 Балансу марганца в компонентах шихты

Если из фактического количества марганца, внесенного каждым компонентом шихты, вычесть требуемое его количество для поддержания нужного содержания марганца в чугуне, то можно получить избыток или недостаток марганца, внесенного шихтовыми материалами.

Таблица 8 – Избыток (недостаток) марганца, внесенного компонентами шихты

Параметр	Рудная смесь	Марганцевая руда
Mn · $\eta_{\text{Mn}}$	0,183	19,150
[Mn] · Ч	0,3622	0,1327
(Mn) = Mn · $\eta_{\text{Mn}}$ - [Mn] <sub>ч</sub>	-0,1792	19,0173



Уравнение по балансу марганца принимает вид:  $-0,1792x + 19,0173y = 0$ .

#### 1.2.4 Баланс основных и кислотных оксидов при заданной основности шлака

В связи с тем, что основность каждого компонента шихты будет отличаться от заданной основности шлака, то в компонентах шихты имеет место избыток или недостаток основных оксидов:

$$\pm \overline{RO} = CaO + MgO - B_{\text{шл}} \cdot (SiO_2 - \frac{60}{28} \cdot [Si] \cdot Ч + Al_2O_3),$$

где  $\pm \overline{RO}$  – избыток или недостаток основных оксидов в компонентах шихты;

CaO, MgO и т.д. – содержание соответствующих оксидов в компонентах шихты;

$B_{\text{шл}}$  – заданная основность шлака;

$60/28$  – отношение молекулярных масс  $SiO_2/Si$ ;

$[Si]$  – содержание кремния в чугуне;

$[Si] \cdot Ч$  – количество кремния, переходящее из данного компонента в чугун.

Алгебраическая сумма избытков и недостатков основных оксидов в компонентах шихты должна быть равна нулю.

Уравнение по балансу основности имеет вид:

$$(\pm \overline{RO})_{\text{р.с.}} \cdot M_{\text{р.с.}} + (\pm \overline{RO})_{\text{м.р.}} \cdot M_{\text{м.р.}} + (\pm \overline{RO})_{\text{изв.}} \cdot M_{\text{изв.}} = 0$$

Тогда

$$\overline{RO}_{\text{р.с.}} = 7,57 + 1,17 - 1,1 \cdot (8,12 - \frac{60}{28} \cdot 0,6 \cdot 0,6036 + 1,66) = -1,1643;$$

$$\overline{RO}_{\text{м.р.}} = 4,1 + 1,5 - 1,1 \cdot (24,1 - \frac{60}{28} \cdot 0,6 \cdot 0,2212 + 4) = -24,9972;$$

$$\overline{RO}_{\text{изв.}} = 38,5 + 12,6 - 1,1 \cdot (1,2 - \frac{60}{28} \cdot 0,6 \cdot 0,0043 + 1,1) = 48,5761;$$

$$\overline{RO}_{\text{к}} = 0,27 + 0,17 - 1,1 \cdot (4,25 - \frac{60}{28} \cdot 0,6 \cdot 0,0173 + 2,53) = 6,9935;$$

$$-1,1643x - 24,9972y + 48,5761z = 0.$$

Расход флюса на ошлакование золы единицы кокса:

$$z' = \frac{\overline{RO}_{\text{к}}}{\overline{RO}_{\text{изв.}}}$$

$$z' = \frac{6,9935}{48,5761} = 0,1440.$$

На ошлакование золы всего кокса:  $z_{\text{к}} = z' \cdot K = 0,1440 \cdot K$ .

Таким образом, получается система следующих уравнений:

$$\begin{cases} 0,6036x + 0,2212y + 0,0043z = 1000 \\ -0,1792x + 19,0173y = 0 \\ -1,1643x - 24,9972y + 48,5761z = 0 \end{cases}$$

Решив систему уравнений можно получить

$$x = 1650,6793 \text{ кг}$$

$$y = 15,55039 \text{ кг}$$

$$z = 48,86862 \text{ кг.}$$

### 1.3 Расчет расхода кокса

Для определения расхода кокса необходимо рассчитывать тепловые эквиваленты материалов доменной шихты.

#### 1.3.1 Понятие о тепловых эквивалентах

Для сравнения металлургической ценности железорудных материалов используют понятие тепловых эквивалентов. Тепловой эквивалент того или иного материала представляет собой количество тепла, которое надо затратить в доменной печи для выплавки чугуна при использовании единицы ( $1 \text{ кг}$  или  $1 \text{ м}^3$ ) этого материала.

Знаки тепловых эквивалентов горючих материалов доменной плавки (кокса, мазута, природного газа и др.) и других сырых материалов неодинаковы: отрицательны для горючих материалов, так как они не потребляют, а выделяют тепло в доменной печи, и положительны для остальных материалов шихты.

Кроме химического состава, тепловой эквивалент зависит также от ряда факторов, связанных с получением того или иного сорта чугуна при необходимых основности шлака, температуре и составе дутья и колошникового газа, с уносом тепла продуктами плавки (чугоном и шлаком) и др.

Математически тепловой эквивалент каждого шихтового материала представляет собой сумму произведений содержаний элементов или оксидов на тепловые эквиваленты этих элементов и оксидов. В общем случае тепловой эквивалент любого шихтового материала можно представить в виде:

$$\begin{aligned} q_M = & q_{\text{SiO}_2} \text{SiO}_2 + q_{\text{Al}_2\text{O}_3} \text{Al}_2\text{O}_3 + q_{\text{CaO}} \text{CaO} + q_{\text{MgO}} \text{MgO} + q_S \text{Sn}_S + q_{\text{SiO}_2} \text{SiO}_2 + \\ & + q_P \text{P} + q_{\text{Mn}_{\text{MnO}}} \text{Mn}_{\text{MnO}} + q_{\text{Mn}_{\text{MnO}_2}} \text{Mn}_{\text{MnO}_2} + q_{\text{Mn}_{\text{Mn}_2\text{O}_3}} \text{Mn}_{\text{Mn}_2\text{O}_3} + q_{\text{Mn}_{\text{Mn}_3\text{O}_4}} \text{Mn}_{\text{Mn}_3\text{O}_4} + \\ & + q_{\text{Mn}_{\text{мет}}} \text{Mn}_{\text{мет}} + q_{\text{Mn}_{\text{MnCO}_3}} \text{Mn}_{\text{MnCO}_3} + q_{\text{Mn}_{\text{MnSiO}_3}} \text{Mn}_{\text{MnSiO}_3} + q_{\text{Fe}_{\text{FeO}}} \text{Fe}_{\text{FeO}} + \\ & + q_{\text{Fe}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} \text{Fe}_{\text{Fe}_2\text{O}_3} + q_{\text{Fe}_{\text{FeCO}_3}} \text{Fe}_{\text{FeCO}_3} + q_{\text{Fe}_{\text{мет}}} \text{Fe}_{\text{мет}} + q_{\text{Fe}_{\text{FeSiO}_4}} \text{Fe}_{\text{FeSiO}_4} + q_{\text{CO}_2} \text{CO}_2 + \\ & + q_{\text{H}_2\text{O}_{\text{гипр}}} \text{H}_2\text{O}_{\text{гипр}} + q_{[\text{Si}]} + \dots - (q_C - Z_C)C, \end{aligned}$$

где  $Q_{SiO_2}, Q_{Al_2O_3}, Q_S \dots$  – тепловые эквиваленты соответствующих оксидов и элементов, кДж/кг;

$SiO_2, Al_2O_3, S$  – содержание соответствующих оксидов и элементов в данном шихтовом материале;

% — коэффициент перехода серы в шлак;

$Z_C$  – тепловые потери, кДж/кг С.

Материал, обладающий меньшим тепловым эквивалентом, имеет большую металлургическую ценность, так как требует для переплава меньшее количество тепла.

### 1.3.2 Расчет тепловых эквивалентов элементов и соединений

1. Тепловой эквивалент углерода, сгорающего у фурм. При сгорании углерода у фурм в кислороде дутья по реакции  $C + 0,5O_2 = CO$  выделяется 117940 кДж, или на 1 кг С 117940/12 кДж. В печь также вносится тепло с нагретым дутьем, количество которого зависит от объема дутья. Часть тепла, вносимого в печь, уносится с колошниковым газом, поэтому это количество тепла следует вычесть. В общем виде тепловой эквивалент углерода, сгорающего у фурм, имеет вид:

$$q_c = \frac{117940}{Ar_c} + \frac{22,4}{2 \cdot Ar_c [\omega(1-f) + 0,5 \cdot f]} \left[ (1-f) \cdot W_{O:N}^{t_d} - f \left( \frac{242800}{22,4} - W_{H_2O}^{t_d} \right) - (1 + \omega + f - \omega f) \cdot W_{к.г.}^{t_c} \right]$$

где  $\omega$  – содержание кислорода в сухом дутье, доли единиц;

$f$  – влажность дутья, доли единиц;

$t_d$  – температура горячего дутья, °С;

$W_{O:N}^{t_d}$  – энтальпия двухатомных газов при температуре дутья, кДж/м<sup>3</sup>;

$W_{H_2O}^{t_d}$  – энтальпия колошникового газа, кДж/м<sup>3</sup>.

Тогда

$$q_c = \frac{117940}{12} + \frac{22,4}{2 \cdot 12 \cdot [0,24 \cdot 0,99 + 0,5 \cdot 0,01]} [0,99 \cdot 1719,1 - 0,01 \cdot x \cdot \left( \frac{242800}{22,4} - 2132,3 \right) - (1 + 0,24 + 0,01 - 0,24 \cdot 0,01) \cdot 420,8] = 14021,21 \text{ кДж / кг С}$$

2. Тепловой эквивалент углерода прямого восстановления. При прямом восстановлении для окисления углерода расходуется не нагретый воздух, а кислород шихты. В связи с этим:

$$q_{C_d} = \frac{117940}{Ar_C} - \frac{22,4}{Ar_C} \cdot W_{CO}^{t_k},$$

$$q_{C_d} = \frac{117940}{12} - \frac{22,4}{12} \cdot 420,8 = 9042,84 \text{ кДж / кг С.}$$

### 3. Тепловой эквивалент оксида кальция.

Известь может поступать в доменную шихту в виде сырого известняка  $CaCO_3$ , офлюсованных агломерата или окатышей ( $CaO$  будет находиться в виде силикатов или ферритов кальция) реже в свободном виде. При разложении известняка в доменной печи по реакции:



необходимо затратить  $178500/56 = 3192$  кДж/кг  $CaO$ . Оксид кальция переходит в шлак. При взаимодействии  $CaO$  и  $SiO_2$  выделяется около 1260 кДж/кг.

$$q_{CaO_{CaCa_3}} = Q_{шл} + 3192 - 1260 = Q_{шл} + 1932 \text{ кДж / кг ,}$$

где  $Q_{шл}$  – энтальпия шлака, кДж/кг.

Если известь связана в силикаты кальция (офлюсованный агломерат), то экономия тепла по сравнению с первым случаем составит:

$$q_{CaO_{Ca_2SiO_4}} = Q_{шл} - (Q_{шл} + 1932) = -1932 \text{ кДж / кг .}$$

Если известь находится в свободном виде, расход тепла составит:

$$q_{CaO} = Q_{шл} - 1260 \text{ кДж / кг .}$$

При экономии в расходе тепла

$$q_{CaO} = Q_{шл} - 1260 - (Q_{шл} + 1932) = -3192 \text{ кДж / кг}$$

$$q_{CaO_{Ca_2SiO_4}} = 1700 - (1700 + 1932) = -1932 \text{ кДж / кг .}$$

### 4. Тепловой эквивалент оксида кремния.

$$q_{SiO_2} = Q_{шл} + B \cdot (Q_{шл} + 1932) \text{ кДж / кг } SiO_2$$

$$q_{SiO_2} = 1700 + 1,1 \cdot (1700 + 1932) = 5695,2 \text{ кДж / кг } SiO_2 .$$

### 5. Тепловой эквивалент глинозема.

Теплота образования  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  составляет примерно 840 кДж/кг  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

$$q_{\text{Al}_2\text{O}_3} = Q_{\text{шл}} - 840 + B \cdot (Q_{\text{шл}} + 3192) \text{ кДж / кг } \text{Al}_2\text{O}_3,$$

$$q_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1700 - 840 + 1,1 \cdot (1700 + 3192) = 6241,2 \text{ кДж / кг } \text{Al}_2\text{O}_3.$$

### 6. Тепловой эквивалент оксида магния.

Подобно извести  $\text{MgO}$  может находиться в доменной шихте в виде  $\text{MgCO}_3$ , силикатов магния ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ ) и свободном виде.

По реакции  $\text{MgCO}_3 = \text{MgO} + \text{CO}_2 - 109870$  кДж для разложения необходимо затратить  $109870/40 = 2747$  кДж/кг  $\text{MgO}$ . При ошлаковании оксида магния с образованием  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  выделяется 794 кДж/кг  $\text{MgO}$ . Следовательно:

$$q_{\text{MgO}_{\text{MgCO}_3}} = Q_{\text{шл}} + 2747 - 794 = Q_{\text{шл}} + 1953 \text{ кДж / кг } \text{MgO}.$$

Экономия в расходе тепла, если оксид магния связан в силикат или находится в свободном виде, соответственно составит:

$$q_{\text{MgO}_{\text{Mg}_2\text{SiO}_4}} = Q_{\text{шл}} - (Q_{\text{шл}} + 1953) = -1953 \text{ кДж / кг } \text{MgO};$$

$$q_{\text{MgO}_{\text{св}}} = (Q_{\text{шл}} - 794) - (Q_{\text{шл}} + 1953) = -2747 \text{ кДж / кг } \text{MgO}.$$

### 7. Тепловой эквивалент серы.

Для упрощения расчета принимается, что сульфидная и органическая сера находится в свободном виде. Перевод серы в шлак идет по реакции  $\text{CaO} + \text{S} = \text{CaS} + 0,5 \cdot \text{O}_2 - 173630$  кДж/кг, или 5426 кДж/кг S. При этом следует дополнительно учитывать расход тепла на разложение известняка, необходимого для получения оксида кальция. Этот расход составит  $3292 \cdot 56/32$  кДж/кг. Тогда тепловые эквиваленты сульфидной и органической серы:

$$q_S = 5426 + 3192 \cdot \frac{Mr_{\text{CaO}}}{Mr_S} + Q_{\text{шл}} \cdot \frac{Mr_{\text{CaS}}}{Mr_S} = 11012 + 2,25 \cdot Q_{\text{шл}}.$$

В случае сульфатной серы  $\text{CaSO}_4 = \text{CaS} + 2\text{O}_2 - 921190$  кДж, или 28787 кДж/кг S.

$$q_{\text{S}_{\text{CaSO}_4}} = 28787 + Q_{\text{шл}} \cdot \frac{72}{32} = 28787 + 2,25 \cdot Q_{\text{шл}},$$

$$q_S = 11012 + 2,25 \cdot 1700 = 14837 \text{ кДж / кг S};$$

$$q_{\text{S}_{\text{CaSO}_4}} = 28787 + 2,25 \cdot 1700 = 32612 \text{ кДж / кг S}.$$

### 8. Тепловой эквивалент фосфора.

Расход тепла на диссоциацию оксида фосфора составляет 25066 кДж/кг Р, затрата углерода на восстановление  $P_2O_5 - 5C = 2P + 5CO$  равна:

$$\frac{5A_{rC}}{2A_{rP}} = \frac{60}{62} = 0,9677 \approx 1 \text{ кг / кг Р.}$$

При образовании  $Fe_3P$  выделяется 4767 кДж/кг Р. Потери тепла от прямого восстановления фосфора составит  $1 \cdot (q_C - q_{C_d})$  кДж/кг Р.

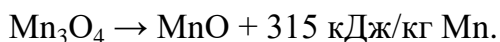
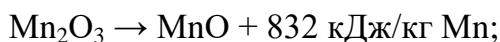
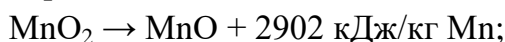
Тепловой эквивалент фосфора:

$$q_P = 25066 + Q_{\text{ч}} + (q_C - q_{C_d}) - 4767 = 202999 + Q_{\text{ч}} + q_C - q_{C_d},$$

$$q_P = 202999 + 1150 + 14021,21 - 9042,84 = 26427,37 \text{ кДж/кг Р.}$$

### 9. Тепловой эквивалент марганца.

Принимают, что восстановление марганца из высших оксидов до  $MnO$  происходит посредством  $CO$  с выделением тепла:



Марганец образует с углеродом устойчивый карбид, теплота образования которого составляет 584 кДж/кг Mn. Затрата углерода на образование карбида ( $Mn_3C$ ) по реакции:  $3Mn + C = Mn_3C$  составляет:

$$\frac{A_{rC}}{3A_{rMn}} = \frac{12}{165} = 0,073 \text{ кг / кг Mn.}$$

Потеря тепла  $0,073 \cdot q_C$ . На прямое восстановление 1 кг Mn по реакции  $MnO + C = Mn + CO$  расходуется углерода:

$$\frac{A_{rC}}{A_{rMn}} = \frac{12}{55} = 0,218 \text{ кг / кг Mn.}$$

Соответственно, потеря тепла составляет  $0,218 (q_C - q_{C_d})$ . Из 1 единицы марганца, переходящего в чугун, получим  $1 + 0,073$  единицы карбида марганца. Оксид  $MnO$  уносит со шлаком  $Q_{\text{шл}} \cdot (71/55) = 1,29 \cdot Q_{\text{шл}}$ .

При образовании в шлаке силиката марганца выделяется 496 кДж/кг Mn. Общий расход тепла на 1 кг Mn в шлаке составляет  $1,29 \cdot Q_{\text{шл}} - 496$ ; на разложение  $MnCO_3$  1751 кДж/кг Mn. На диссоциацию  $MnO$  расходуется 7388 кДж/кг Mn, тогда:

$$q_{Mn_{MnO}} = [7388 + 0,073q_C + 0,218(q_C - q_{C_d}) + 1,073Q_{\text{ч}} - 584] \eta_{Mn} + (1,29Q_{\text{шл}} - 496) \cdot (1 - \eta_{Mn})$$

$$q_{Mn_{MnO_2}} = q_{Mn_{MnO}} - 2902 ;$$

$$q_{Mn_{Mn_2O_3}} = q_{Mn_{MnO}} - 832 ;$$

$$\begin{aligned}
q_{\text{Mn}_{\text{Mn}_3\text{O}_4}} &= q_{\text{Mn}_{\text{MnO}}} - 315; \\
q_{\text{Mn}_{\text{Mn}_3\text{C}_3}} &= q_{\text{Mn}_{\text{MnO}}} + 1751; \\
q_{\text{Mn}_{\text{MnSiO}_4}} &= q_{\text{Mn}_{\text{MnO}}} - 496(1 - \eta_{\text{Mn}}); \\
q_{\text{Mn}_{\text{мет}}} &= (0,073 + 1,073Q)\eta_{\text{Mn}} + (1,29Q_{\text{шл}} - 496) \cdot (1 - \eta_{\text{Mn}}),
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_{\text{Mn}_{\text{MnO}}} &= [7388 + 0,073 \cdot 14021,21 + 0,218(14021,21 - 9042,84) + \\
&\quad + 1,073 \cdot 1150 - 584] \cdot 0,55 + (1,29 \cdot 1700 - 496) \cdot (1 - 0,55) = \\
&= 6344,38 \text{ кДж / кг Mn}_{\text{MnO}};
\end{aligned}$$

$$q_{\text{Mn}_{\text{MnO}_2}} = 6344,38 - 2902 = 3442,38 \text{ кДж / кг Mn}_{\text{MnO}_2};$$

$$q_{\text{Mn}_{\text{Mn}_3\text{O}_4}} = 6344,38 - 315 = 6029,38 \text{ кДж / кг Mn}_{\text{Mn}_3\text{O}_4}.$$

#### 10. Тепловой эквивалент железа.

При расчете тепловых эквивалентов железа исходят из следующих предпосылок:

а) установленная общая степень развития прямого и непрямого восстановления ( $R_i$  и  $r_d$ ) распространяется и на оксиды железа;

б) все железо переходит в чугуны;

в) отношение содержаний растворенного в чугуне углерода к железу принимаем равным  $4 : 93 = 0,043$ ;

г) положительный эффект при восстановлении оксидов железа оксидом углерода и отрицательный тепловой эффект при восстановлении водородом пренебрежимо малы.

Расход тепла на диссоциацию  $\text{FeO} = \text{Fe} + 0,5\text{O}_2 - 270610$  кДж составит  $(270610/56) \cdot r_d$  (расход тепла необходим согласно условиям расчета лишь на прямое восстановление).

Потеря тепла, связанная с образованием карбида железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ , и потеря тепла от прямого восстановления составят  $\frac{12}{56} (q_C - q_{C_d}) \cdot r_d$ . Из 1 единицы железа образуется 1,043 единицы чугуна, на нагрев и расплавление которого требуется  $1,043 Q_{\text{ч}}$  кДж. Тогда:

$$q_{\text{Fe}_{\text{FeO}}} = \frac{270610}{\text{Ar}_{\text{Fe}}} r_d + 0,043 \cdot q_C + \frac{\text{Ar}_C}{\text{Ar}_{\text{Fe}}} (q_C - q_{C_d}) \cdot r_d + 1,043 \cdot Q_{\text{ч}};$$

$$q_{\text{Fe}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} = q_{\text{Fe}_{\text{FeO}}} + 2554 \cdot r_d + \frac{\text{Ar}_C}{2\text{Ar}_{\text{Fe}}} (q_C - q_{C_d}) \cdot r_d;$$

$$q_{\text{Fe}_{\text{FeCO}_3}} = q_{\text{Fe}_{\text{FeO}}} + 1571$$

$$q_{\text{Fe}_{\text{FeSiO}_4}} = q_{\text{Fe}_{\text{FeO}}} + 424$$

$$q_{\text{Fe}_{\text{мет}}} = 1,043Q_{\text{ч}} + 0,043 \cdot q_C,$$

где 2554 – теплота диссоциации  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  на  $\text{FeO}$  и  $\text{O}_2$ , кДж/кг Fe;

1571 – теплота разложения  $\text{FeCO}_3$ , кДж/кг Fe;

424 — теплота разложения  $\text{Fe}_3\text{SiO}_4$  на  $\text{FeO}$  и  $\text{SiO}_2$ , кДж/кг Fe:

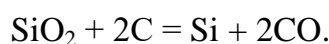
Тогда

$$q_{\text{FeFeO}} = \frac{270610}{56} \cdot 0,35 + 0,043 \cdot 14021,21 + \frac{12}{56} (14021,21 - 9042,84) \cdot 0,35 + 1,043 \cdot 1150 = 3867,05 \text{ кДж / кг Fe}_{\text{FeO}};$$

$$q_{\text{FeFe}_2\text{O}_3} = 3867,05 + 2554 \cdot 0,35 + \frac{12}{112} (14021,21 - 9042,84) \cdot 0,35 = 4947,64 \text{ кДж / кг Fe}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}.$$

### 11. Тепловой эквивалент кремния.

Принимается, что кремний находится в чугунах в виде  $\text{FeSi}$ . На диссоциацию  $\text{SiO}_2 = \text{Si} + \text{O}_2$  расходуется 14549 кДж/кг  $\text{SiO}_2$ , а при образовании  $\text{FeSi}$  выделяется (в пересчете на 1 кг  $\text{SiO}_2$ ) 1344 кДж. Потеря тепла с углеродом прямого восстановления составит  $(q_c - q_{c_d}) \cdot (24/60)$ , так как:



Из тепла, затраченного на восстановление кремния, надо вычесть тепло для перевода  $\text{SiO}_2$  в шлак. Тогда

$$q_{[\text{Si}]} = \left[ 14549 + (q_c - q_{c_d}) \frac{2\text{Ar}_c}{\text{Mr}_{\text{SiO}_2}} + Q_{\text{ч}} \frac{\text{Ar}_{\text{Si}}}{\text{Mr}_{\text{SiO}_2}} - 1344 - \{Q_{\text{шл}} + B \cdot (Q_{\text{шл}} + 1932)\} \right] \times \\ \times \frac{\text{Ч} \cdot [\text{Si}]_{\text{ч}} \cdot \text{Mr}_{\text{SiO}_2}}{100 \cdot \text{Ar}_{\text{Si}}},$$

где Ч – выход чугуна из данного материала.

Следует обратить внимание на то, что в отличие от других эквивалентов в данном случае величину теплового эквивалента кремния рассчитывают для 1 кг соответствующего шихтового материала:

$$q_{[\text{Si}]} = \left[ 14549 + (q_c - q_{c_d}) \frac{2\text{Ar}_c}{\text{Mr}_{\text{SiO}_2}} + Q_{\text{ч}} \frac{\text{Ar}_{\text{Si}}}{\text{Mr}_{\text{SiO}_2}} - 1344 - \{Q_{\text{шл}} + B(Q_{\text{шл}} + 1932)\} \right] \times \\ \times \frac{\text{Ч} \cdot [\text{Si}]_{\text{ч}} \cdot \text{Mr}_{\text{SiO}_2}}{100 \cdot \text{Ar}_{\text{Si}}},$$



$$\begin{aligned}
q_{[\text{Si}]_{\text{p.c.}}} &= \left[ 14549 + (14021,21 - 9042,84) \frac{24}{60} + 1150 \frac{28}{60} - 1344 - \{1700 + 1,1(1700 + 1932)\} \right] \times \\
&\times \frac{0,6036 \cdot 0,6 \cdot 60}{100 \cdot 28} = 77,9 \text{ кДж/кг п.с.}; \\
q_{[\text{Si}]_{\text{м.п.}}} &= \left[ 14549 + (14021,21 - 9042,84) \frac{24}{60} + 1150 \frac{28}{60} - 1344 - \{1700 + 1,1(1700 + 1932)\} \right] \times \\
&\times \frac{0,2212 \cdot 0,6 \cdot 60}{100 \cdot 28} = 28,55 \text{ кДж/кг м.п.}; \\
q_{[\text{Si}]_{\text{изв.}}} &= \left[ 14549 + (14021,21 - 9042,84) \frac{24}{60} + 1150 \frac{28}{60} - 1344 - \{1700 + 1,1(1700 + 1932)\} \right] \times \\
&\times \frac{0,0043 \cdot 0,6 \cdot 60}{100 \cdot 28} = 0,55 \text{ кДж/кг изв.}; \\
q_{[\text{Si}]_{\text{к}}} &= \left[ 14549 + (14021,21 - 9042,84) \frac{24}{60} + 1150 \frac{28}{60} - 1344 - \{1700 + 1,1(1700 + 1932)\} \right] \times \\
&\times \frac{0,0173 \cdot 0,6 \cdot 60}{100 \cdot 28} = 2,23 \text{ кДж/кг кокса.}
\end{aligned}$$

## 12. Тепловой эквивалент гидратной воды.

В доменной печи вода, выделяющаяся при разложении гидратов, частично разлагается по реакциям:  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO} = \text{H}_2 + \text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O} + \text{C} = \text{H}_2 + \text{CO}$ .

Степень развития каждой реакции, как и общую степень разложения гидратной воды, определить трудно. Поэтому условно принимают, что средняя степень непрямого восстановления относится и к разлагающейся гидратной воде, а общая степень разложения гидратной воды равна 30%. Тогда:

$$q_{\text{H}_2\text{O}_{\text{гидр}}} = 4200 + 0,3 \left( \left[ \frac{242800}{M_{\text{H}_2\text{O}}} + (q_{\text{C}} - q_{\text{C}_d}) \frac{M_{\text{C}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \right] \cdot r_d - \frac{284260 - 242800}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot R_i \right),$$

где 284260 – теплота окисления CO до CO<sub>2</sub>, кДж;

242800 – теплота диссоциации воды, кДж;

4200 – теплота разложения гидратов и испарения гидратной воды, кДж/кг.

Тогда

$$\begin{aligned}
q_{\text{H}_2\text{O}_{\text{гидр}}} &= 4200 + 0,3 \left( \left[ \frac{242800}{18} + (14021,21 - 9042,84) \frac{12}{18} \right] \cdot 0,35 - \frac{284260 - 242800}{18} \cdot 0,65 \right) = \\
&= 5515,67 \text{ кДж/кг H}_2\text{O}_{\text{гидр}}
\end{aligned}$$

## 13. Тепловой эквивалент диоксида углерода.

Принимают, что общая степень прямого восстановления относится и к разложению CO<sub>2</sub> шихты по реакции  $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ . Тогда:

$$q_{\text{CO}_2} = \left( \frac{284260}{\text{Mr}_{\text{CO}_2}} + (q_c - q_{c_d}) \cdot \frac{\text{Mr}_c}{\text{Mr}_{\text{CO}_2}} \right) \cdot r_d,$$

где 284260 — теплота диссоциации  $\text{CO}_2$ , кДж.

Тогда

$$q_{\text{CO}_2} = \left( \frac{284260}{44} + (14021,21 - 9042,84) \cdot \frac{12}{44} \right) \cdot 0,35 = 2736,36 \text{ кДж/кг CO}_2.$$

### 1.3.3 Расчет тепловых эквивалентов компонентов доменной шихты и дополнительного топлива

Зная данные о тепловых эквивалентах отдельных элементов и их соединений, а также химический состав материалов, можно определить их тепловые эквиваленты, используя общую формулу ( $q_m$ ) приведенную в пункте 1.3.1.

#### 1. Тепловой эквивалент железорудной смеси

$$\begin{aligned} q_{\text{p.c.}} = & q_{\text{SiO}_2} \cdot \text{SiO}_{2 \text{ п.с.}} + q_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot \text{Al}_{2\text{O}_3 \text{ п.с.}} + q_{\text{CaO}_{\text{Ca}_2\text{SiO}_4}} \cdot \text{CaO}_{\text{п.с.}} + q_{\text{MgO}_{\text{Mg}_2\text{SiO}_2}} \cdot \text{MgO}_{\text{п.с.}} + \\ & + q_{\text{S}_{\text{сульф}}} \cdot \text{S}_{\text{п.с.}} \cdot \eta_S + q_P \cdot \text{P}_{\text{п.с.}} + q_{\text{Mn}_{\text{MnO}}} \cdot \text{Mn}_{\text{MnO п.с.}} \cdot \frac{\text{Mr}_{\text{Mn}}}{\text{Mr}_{\text{MnO}}} + \\ & + q_{\text{Fe}_{\text{FeO}}} \cdot \text{Fe}_{\text{FeO п.с.}} \cdot \frac{\text{Mr}_{\text{Fe}}}{\text{Mr}_{\text{FeO}}} + q_{\text{Fe}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} \cdot \text{Fe}_{\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ п.с.}} \cdot \frac{2 \cdot \text{Mr}_{\text{Fe}}}{\text{Mr}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} + q_{\text{Si п.с.}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{\text{п.с.}} = & 5695,2 \cdot 0,0812 + 6241,2 \cdot 0,0166 - 1932 \cdot 0,0757 - 1953 \cdot 0,0113 + \\ & + 14837 \cdot 0,00042 \cdot 0,85 + 26427,37 \cdot 0,00028 + 6344,38 \cdot 0,0043 \cdot \frac{55}{71} + \\ & + 3867,05 \cdot 0,0737 \cdot \frac{56}{72} + 4947,64 \cdot 0,7409 \cdot \frac{2 \cdot 56}{160} + 77,9 = 3297,12 \text{ кДж/кг п.с.} \end{aligned}$$

#### 2. Тепловой эквивалент марганцевой руды

$$\begin{aligned} q_{\text{м.п.}} = & q_{\text{SiO}_2} \cdot \text{SiO}_{2 \text{ м.п.}} + q_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot \text{Al}_{2\text{O}_3 \text{ м.п.}} + q_{\text{CaO}_{\text{Ca}_2\text{SiO}_4}} \cdot \text{CaO}_{\text{м.п.}} + q_{\text{MgO}_{\text{Mg}_2\text{SiO}_2}} \cdot \text{MgO}_{\text{м.п.}} + \\ & + q_{\text{S}_{\text{сульф}}} \cdot \text{S}_{\text{м.п.}} \cdot \eta_S + q_P \cdot \text{P}_{\text{м.п.}} + q_{\text{Mn}_{\text{MnO}_2}} \cdot \text{Mn}_{\text{MnO}_2 \text{ м.п.}} \cdot \frac{\text{Mr}_{\text{Mn}}}{\text{Mr}_{\text{MnO}_2}} + \\ & + q_{\text{Mn}_{\text{MnO}}} \cdot \text{Mn}_{\text{MnO м.п.}} \cdot \frac{\text{Mr}_{\text{Mn}}}{\text{Mr}_{\text{MnO}}} + q_{\text{Fe}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} \cdot \text{Fe}_{\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ м.п.}} \cdot \frac{2 \cdot \text{Mr}_{\text{Fe}}}{\text{Mr}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} + q_{\text{Si м.п.}}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
q_{\text{м.р.}} &= 5695,2 \cdot 0,241 + 6241,2 \cdot 0,04 - 1932 \cdot 0,041 - 1953 \cdot 0,015 + \\
&+ 14837 \cdot 0,0028 \cdot 0,85 + 26427,37 \cdot 0,0004 + 6344,38 \cdot 0,035 \cdot \frac{55}{71} + \\
&+ 3442,38 \cdot 0,508 \cdot \frac{55}{87} + 4947,64 \cdot 0,042 \cdot \frac{2 \cdot 56}{160} + 28,55 = 3011,11 \text{ кДж / кг м.р.}
\end{aligned}$$

### 3. Тепловой эквивалент флюса

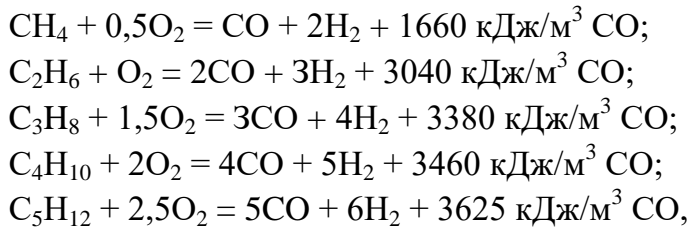
$$\begin{aligned}
q_{\text{изв}} &= q_{\text{SiO}_2} \cdot \text{SiO}_2_{\text{изв}} + q_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3_{\text{изв}} + q_{\text{S}_{\text{сульф}}} \cdot \text{S}_{\text{изв}} \cdot \eta_{\text{S}} + \\
&+ q_{\text{P}} \cdot \text{P}_{\text{изв}} + q_{\text{Fe}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} \cdot \text{Fe}_{\text{Fe}_2\text{O}_3_{\text{изв}}} \cdot \frac{2 \cdot \text{Mr}_{\text{Fe}}}{\text{Mr}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} + q_{\text{Si}_{\text{изв}}} + q_{\text{CO}_2} \cdot \text{CO}_2_{\text{изв}}
\end{aligned}$$

Затраты тепла на образование и усвоение CaO и MgO учтены в тепловых эквивалентах SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> шихты.

$$\begin{aligned}
q_{\text{изв}} &= 5695,2 \cdot 0,012 + 6241,2 \cdot 0,011 + 14837 \cdot 0,0001 \cdot 0,85 + \\
&+ 26427,37 \cdot 0,00013 + 4947,64 \cdot 0,006 \cdot \frac{112}{160} + 0,55 + 2736,36 \cdot 0,459 = \\
&= 1419,01 \text{ кДж / кг изв.}
\end{aligned}$$

### 4. Тепловой эквивалент природного газа.

При неполном горении составляющих природного газа (при нормальных условиях) выделяется тепло:



Тогда тепловой эквивалент природного газа можно найти из уравнения

$$\begin{aligned}
q_{\text{п.г.}} &= 1660 \cdot \text{CO}_{\text{CH}_4} + 2 \cdot 3040 \cdot \text{CO}_{\text{C}_2\text{H}_6} + 3 \cdot 3380 \cdot \text{CO}_{\text{C}_3\text{H}_8} + 4 \cdot 3460 \cdot \text{CO}_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + \\
&+ 5 \cdot 3625 \cdot \text{CO}_{\text{C}_5\text{H}_{12}} + V_{\text{д}}^{\text{п.г.}} \cdot W_{\text{д}}^{t_{\text{д}}} - V_{\text{пр.гор}}^{\text{п.г.}} \cdot W_{\text{пр.ст}}^{t_{\text{к}}}
\end{aligned}$$

где CO<sub>CH<sub>4</sub></sub>, CO<sub>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></sub> и т. д. – выход CO из соответствующих соединений природного газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

V<sub>д</sub> – количество дутья, необходимое для сжигания 1 м<sup>3</sup> природного газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

W<sub>д</sub><sup>t<sub>д</sub></sup> – энтальпия влажного дутья, кДж/м<sup>3</sup>;

V<sub>пр.ст</sub> – количество продуктов сгорания природного газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;

W<sub>пр.ст</sub><sup>t<sub>к</sub></sup> – энтальпия колошникового газа, образовавшегося при сжигании 1 м<sup>3</sup> природного газа, кДж.

Расчет неизвестных величин проводится последовательно.

а) Определяется масса природного газа вдуваемого на 1 т чугуна:

$$M_{1\text{м}^3 \text{ п.г.}} = \frac{\text{CH}_4 \cdot \text{Mr}_{\text{CH}_4} + \text{C}_2\text{H}_6 \cdot \text{Mr}_{\text{C}_2\text{H}_6} + \text{C}_3\text{H}_8 \cdot \text{Mr}_{\text{C}_3\text{H}_8} + \text{C}_4\text{H}_{10} \cdot \text{Mr}_{\text{C}_4\text{H}_{10}} + \text{C}_5\text{H}_{12} \cdot \text{Mr}_{\text{C}_5\text{H}_{12}}}{22,4} + \frac{\text{N}_2 \cdot \text{Mr}_{\text{N}_2} + \text{CO}_2 \cdot \text{Mr}_{\text{CO}_2}}{22,4},$$

$$M_{1\text{м}^3 \text{ п.г.}} = \frac{0,9 \cdot 16 + 0,03 \cdot 30 + 0,01 \cdot 44 + 0,01 \cdot 58 + 0,05 \cdot 72}{22,4} = 0,889 \text{ кг} - \text{масса } 120 \text{ м}^3$$

природного газа;

$$M_{\text{п.г.}} = M_{1\text{м}^3 \text{ п.г.}} \cdot V_{\text{п.г.}}$$

Тогда  $M_{\text{п.г.}} = 0,889 \cdot 120 = 106,68 \text{ кг/т}$  чугуна.

б) На сжигание  $1 \text{ м}^3$  природного газа до оксида углерода требуется кислорода дутья:

$$\text{в) } V_{\text{O}_2}^{1\text{м}^3 \text{ п.г.}} = 0,5 \cdot \text{CH}_4 + 1 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 1,5 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 2 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 2,5 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12},$$

где 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5 и др. – стехиометрические коэффициенты реакций окисления компонентов природного газа до CO и H<sub>2</sub> по реакциям.

$$\text{Тогда } V_{\text{O}_2}^{1\text{м}^3 \text{ п.г.}} = 0,5 \cdot 0,9 + 0,03 + 1,5 \cdot 0,01 + 2 \cdot 0,01 + 2,5 \cdot 0,05 = 0,64 \text{ м}^3,$$

На сжигание всего объема природного газа требуется кислорода дутья:

$$V_{\text{O}_2}^{\text{п.г.}} = V_{\text{п.г.}} \cdot V_{\text{O}_2}^{1\text{м}^3 \text{ п.г.}}$$

$$V_{\text{O}_2}^{\text{п.г.}} = 120 \cdot 0,64 = 76,8 \text{ м}^3.$$

г) Для обеспечения такого количества кислорода требуется влажного дутья:

$$V_{\text{д}}^{\text{п.г.}} = \frac{V_{\text{O}_2}^{\text{п.г.}}}{\omega \cdot (1-f) + 0,5f},$$

$$V_{\text{д}}^{\text{п.г.}} = \frac{76,8}{0,24 \cdot (1-0,01) + 0,5 \cdot 0,01} = \frac{76,8}{0,243} = 316,05 \text{ м}^3$$

или в пересчете на  $1 \text{ м}^3$  природного газа:

$$V_{\text{д}}^{1\text{м}^3 \text{ п.г.}} = \frac{316,05}{120} = 2,634 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

д) Во влажном дутье содержание водяного пара:

$$V_{\text{H}_2\text{O}_{\text{д}}}^{\text{п.г.}} = V_{\text{д}}^{\text{п.г.}} \cdot f,$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}_d}^{\text{п.г.}} = 316,05 \cdot 0,01 = 3,1605 \text{ м}^3$$

или

$$M_{\text{H}_2\text{O}_d}^{\text{п.г.}} = V_{\text{H}_2\text{O}_d}^{\text{п.г.}} \cdot \frac{Mr_{\text{H}_2\text{O}}}{22,4},$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}_d}^{\text{п.г.}} = 3,1605 \cdot \frac{18}{22,4} = 2,54 \text{ кг}.$$

е) Количество сухого дутья, необходимого для сжигания природного газа:

$$V_{\text{сух.д}}^{\text{п.г.}} = V_d^{\text{п.г.}} - V_{\text{H}_2\text{O}_d}^{\text{п.г.}},$$

$$V_{\text{сух.д}}^{\text{п.г.}} = 316,05 - 3,1605 = 312,89 \text{ м}^3.$$

В сухом дутье содержится:

Азота

$$V_{\text{N}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}} = V_{\text{сух.д}}^{\text{п.г.}} \cdot (1 - \omega),$$

$$V_{\text{N}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}} = 312,89 \cdot (1 - 0,24) = 237,8 \text{ м}^3.$$

или

$$M_{\text{N}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}} = V_{\text{N}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}} \cdot \frac{Mr_{\text{N}_2}}{22,4},$$

$$M_{\text{N}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}} = 237,8 \cdot \frac{28}{22,4} = 297,25 \text{ кг}.$$

Кислорода

$$V_{\text{O}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}} = V_{\text{сух.д}}^{\text{п.г.}} \cdot \omega,$$

$$V_{\text{O}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}} = 312,89 \cdot 0,24 = 75,09 \text{ м}^3.$$

или

$$M_{\text{O}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}} = V_{\text{O}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}} \cdot \frac{Mr_{\text{O}_2}}{22,4},$$

$$M_{\text{O}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}} = 75,09 \cdot \frac{32}{22,4} = 107,27 \text{ кг.}$$

Масса сухого дутья для сжигания природного газа:

$$M_{\text{сух.д}}^{\text{п.г.}} = M_{\text{N}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}} + M_{\text{O}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}},$$

$$M_{\text{сух.д}}^{\text{п.г.}} = 297,25 + 107,27 = 404,52 \text{ кг.}$$

ж) Масса влажного дутья для сжигания природного газа

$$M_{\text{д}}^{\text{п.г.}} = M_{\text{H}_2\text{O д}}^{\text{п.г.}} + M_{\text{сух.д}}^{\text{п.г.}},$$

$$M_{\text{д}}^{\text{п.г.}} = 2,54 + 404,52 = 407,06 \text{ кг.}$$

з) Количество и состав продуктов горения природного газа

Образуется оксида углерода при горении  $120 \text{ м}^3$  природного газа:

$$V_{\text{CO пр.гор}}^{\text{п.г.}} = V_{\text{п.г.}} \cdot (\text{CH}_4 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 3 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 4 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 5 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + \text{CO} + \text{CO}_2),$$

$$V_{\text{CO пр.гор}}^{\text{п.г.}} = 120 \cdot (0,9 + 2 \cdot 0,03 + 3 \cdot 0,01 + 4 \cdot 0,01 + 5 \cdot 0,05 + 0 + 0) = 153,6 \text{ м}^3.$$

Количество азота в продуктах горения природного газа:

$$V_{\text{N}_2 \text{ пр.гор}}^{\text{п.г.}} = V_{\text{N}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}} + V_{\text{N}_2}^{\text{п.г.}}$$

Так как в составе природного газа в данном примере азот отсутствует, то

$$V_{\text{N}_2 \text{ пр.гор}}^{\text{п.г.}} = V_{\text{N}_2 \text{ сух.д}}^{\text{п.г.}} = 237,8 \text{ м}^3.$$

Количество водорода в газе образующегося при разложении  $120 \text{ м}^3$  природного газа и влаги дутья, расходуемого на сжигание  $120 \text{ м}^3$  природного газа:

$$V_{\text{H}_2 \text{ пр.гор}}^{\text{п.г.}} = V_{\text{п.г.}} \cdot (2 \cdot \text{CH}_4 + 3 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 4 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 5 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 6 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12}) + V_{\text{H}_2\text{O д}}^{\text{п.г.}}$$

Тогда

$$V_{\text{H}_2 \text{ пр.гор}}^{\text{п.г.}} = 120 \cdot (2 \cdot 0,9 + 3 \cdot 0,03 + 4 \cdot 0,01 + 5 \cdot 0,01 + 6 \cdot 0,05) + 3,1605 = 276,76 \text{ м}^3.$$

Итого образуется продуктов горения:

$$V_{\text{пр.гор}}^{\text{п.г.}} = V_{\text{CO пр.гор}}^{\text{п.г.}} + V_{\text{N}_2 \text{ пр.гор}}^{\text{п.г.}} + V_{\text{H}_2 \text{ пр.гор}}^{\text{п.г.}}$$

$$V_{\text{пр.гор}}^{\text{п.г.}} = 153,6 + 237,8 + 276,76 = 668,16 \text{ м}^3.$$

В пересчете на 1 м<sup>3</sup> природного газа

$$V_{\text{пр.гор}}^{1\text{м}^3 \text{ п.г.}} = \frac{668,16}{120} = 5,568 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Часть водорода расходуется на восстановительные процессы

$$V_{\text{H}_2 \text{ воспст}}^{\text{п.г.}} = V_{\text{H}_2}^{\text{п.г.}} \cdot \eta_{\text{H}_2},$$

$$V_{\text{H}_2 \text{ воспст}}^{\text{п.г.}} = 276,76 \cdot 0,4 = 110,704 \text{ м}^3.$$

$$V_{\text{H}_2}^{\text{к.г.}} = V_{\text{H}_2}^{\text{п.г.}} - V_{\text{H}_2 \text{ воспст}}^{\text{п.г.}}$$

$$V_{\text{H}_2}^{\text{к.г.}} = 276,76 - 110,704 = 166,056 \text{ м}^3.$$

и) Определяется энтальпия горячего дутья и продуктов сгорания природного газа

$$W_{\text{д}}^{\text{т.д}} = (1-f) \cdot W_{\text{O,N}}^{\text{т.д}} - f \cdot (W_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{разл}} - W_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{т.д}}),$$

$$W_{\text{д}}^{\text{т.д}} = (1 - 0,01) \cdot 1719,1 - 0,01 \cdot \left( \frac{242800}{22,4} - 2132,3 \right) = 1614,84 \text{ кДж} / \text{м}^3.$$

$$W_{\text{пр.сг}}^{\text{т.к}} = 395,23 \text{ кДж} / \text{м}^3 \text{ (см. приложение).}$$

$$q_{\text{п.г.}} = 1660 \cdot 0,9 + 2 \cdot 3040 \cdot 0,03 + 3 \cdot 3380 \cdot 0,01 + 4 \cdot 3460 \cdot 0,01 + \\ + 5 \cdot 3625 \cdot 0,05 + 2,634 \cdot 1614,84 - 5,568 \cdot 395,23 = 4875,3 \text{ кДж} / \text{м}^3$$

5. Тепловой эквивалент золы кокса:

$$q_{\text{з.к.}} = q_{\text{SiO}_2} \cdot \text{SiO}_2 \text{ п.с.} + q_{\text{Al}_2\text{O}_3} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \text{ п.с.} + q_{\text{CaO}_{\text{Ca}_2\text{SiO}_4}} \cdot \text{CaO}_{\text{п.с.}} + q_{\text{MgO}_{\text{Mg}_2\text{SiO}_2}} \cdot \text{MgO}_{\text{п.с.}} + \\ + q_{\text{P}} \cdot \text{P}_{\text{п.с.}} + q_{\text{Mn}_{\text{Mn}_3\text{O}_4}} \cdot \text{Mn}_{\text{Mn}_3\text{O}_4 \text{ з.к.}} \cdot \frac{3 \cdot \text{Mr}_{\text{Mn}}}{\text{Mr}_{\text{Mn}_3\text{O}_4}} + q_{\text{Fe}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}} \cdot \text{Fe}_{\text{Fe}_2\text{O}_3 \text{ п.с.}} \cdot \frac{2 \cdot \text{Mr}_{\text{Fe}}}{\text{Mr}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}},$$

$$q_{\text{з.к.}} = 5695,2 \cdot 0,409 + 6241,2 \cdot 0,243 - 1932 \cdot 0,026 - 1953 \cdot 0,0164 + \\ + 26427,37 \cdot 0,00459 + 6029,38 \cdot 0,0142 \cdot \frac{165}{229} + 4947,64 \cdot 0,2233 \cdot \frac{112}{160} = \\ = 4720,04 \text{ кДж} / \text{кг з.к.}$$

6. Тепловой эквивалент кокса.

$$q_k = q_{з.к.} \cdot A_k + q_S \cdot S_k \cdot \eta_S + q_{[Si]k} - C_k (q_C - q_{потерь}),$$

$$q_k = 4720,04 \cdot 0,104 + 14837 \cdot 0,0176 \cdot 0,85 + 2,23 - 0,8621(14021,21 - 1260) = -10286,36 \text{ кДж / кг кокса}$$

7. Тепловой эквивалент мазута:

$$q_M = q_C \cdot C_M - q_S \cdot S_M \cdot \eta_S - q_{разл}, \text{ кДж/кг мазута,}$$

где  $C_M$  – содержание углерода в мазуте, доли ед.;

$S_M$  – содержание серы в мазуте, доли ед.;

$\eta_S$  – коэффициент перехода серы в шлак;

$q_{разл}$  – теплота разложения углеводородов (1880-2300 кДж/кг мазута).

В данном примере мазут не применяется.

8. Тепловой эквивалент пылеугольного топлива:

$$q_{пут} = q_C \cdot C_{пут} - q_A \cdot A_{пут}^C - q_S \cdot S_{пут} \cdot \eta_S, \text{ кДж/кг ПУТ,}$$

где  $C_{пут}$  – содержание углерода в ПУТ, доли ед.;

$A_{пут}^C$  – содержание золы в ПУТ, доли ед.

В данном примере ПУТ не применяется.

Общее уравнение для определения расхода кокса:

$$q_k \cdot M_k + q_{п.г.} \cdot V_{п.г.} = q_{р.с.} \cdot M_{р.с.} + q_{м.р.} \cdot M_{м.р.} + q_{изв.} \cdot M_{изв.} + q_{изв.} \cdot z' \cdot M_k.$$

Отсюда:

$$M_k = \frac{q_{р.с.} \cdot M_{р.с.} + q_{м.р.} \cdot M_{м.р.} + q_{изв.} \cdot M_{изв.} - q_{п.г.} \cdot V_{п.г.}}{q_k - q_{изв.} \cdot z'},$$

$$M_k = \frac{3297,12 \cdot 1650,6793 + 3011,11 \cdot 15,55039 + 1419,01 \cdot 48,86862 - 4875,3 \cdot 120}{10286,36 - 1419,01 \cdot 0,144} = 493,32 \text{ кг / т чугуна.}$$

$$z_k = z' \cdot M_k,$$

$$z_k = 493,32 \cdot 0,144 = 71,04 \text{ кг.}$$



## 1.4 Определение удельного расхода компонентов шихты и состава шлака, проверка состава чугуна и основности шлака

### 1.4.1 Расход компонентов шихты

Общий расход известняка:

$$\Sigma M_{\text{изв}} = M_{\text{изв}} + Z_{\text{к}}$$

$$\Sigma M_{\text{изв}} = 48,86862 + 71,04 = 120 \text{ кг.}$$

Далее необходимо скорректировать расходы ранее определенных компонентов шихты, так как с учетом кокса выход чугуна из шихты изменится:

$$M_{\text{ч}} = M_{\text{р.с.}} \cdot \text{Ч}_{\text{р.с.}} + M_{\text{м.р.}} \cdot \text{Ч}_{\text{м.р.}} + \Sigma M_{\text{изв}} \cdot \text{Ч}_{\text{изв}} + M_{\text{к}} \cdot \text{Ч}_{\text{к}}$$

$$M_{\text{ч}} = 1650,6793 \cdot 0,6036 + 15,55039 \cdot 0,2212 + 120 \cdot 0,0043 + 493,32 \cdot 0,0173 = 1008,84 \text{ кг.}$$

Расход рудной смеси составит:

$$M_{\text{р.с.}} = \frac{1650,6793}{1008,84} \cdot 1000 = 1636,22 \text{ кг / т.}$$

В том числе агломерата  $M_{\text{агл}} = 1636,22 \cdot 0,5 = 818,11 \text{ кг/т}$ , окатышей  $M_{\text{окат}} = 818,11 \text{ кг/т}$ .

$$M_{\text{м.р.}} = \frac{15,55039}{1008,84} \cdot 1000 = 15,41 \text{ кг / т}$$

$$M_{\text{изв}} = \frac{120}{1008,84} \cdot 1000 = 118,95 \text{ кг / т}$$

$$M_{\text{к}} = \frac{493,32}{1008,84} \cdot 1000 = 489 \text{ кг / т.}$$

Расход рудной смеси с учётом выноса в колошник 2%, он определяется качеством шихтовых материалов, технологией доменной плавки и изменяется от 1 до 10% (приложение) составляет:

$$M_{\Sigma \text{ р.с.}} = \frac{M_{\text{р.с.}}}{1 - \% \text{ выноса}},$$

$$M_{\Sigma \text{ р.с.}} = \frac{1636,22}{0,98} = 1669,61 \text{ кг.}$$

Расход влажного (2% H<sub>2</sub>O) кокса с учётом выноса составит:

$$M_{\text{КС ВЫНОСОМ}} = \frac{M_{\text{К}}}{1 - (\% \text{H}_2\text{O} + \% \text{ВЫНОСА})},$$

$$M_{\text{КС ВЫНОСОМ}} = \frac{489}{1 - (0,01 + 0,02)} = 504,12 \text{ кг.}$$

Количество влаги шихтовых материалов и пыли, выносимых из доменной печи, равно

$$M_{\text{ВЫНОСА}} = 48,51 \text{ кг.}$$

#### 1.4.2 Расчет состава шлака, проверка состава чугуна и основности шлака

Таблица 9 – Состав чугуна и шлака

Компонент шихты	Рудная смесь		Марганцевая руда		Известняк		Кокс		Итого	Переходит в чугун		Переходит в шлак	
	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг		кг	%	кг	%
Расход, кг	1636,22		15,41		118,95		489						
Fe	57,60	942,46	2,94	0,45	0,42	0,50	1,63	7,97	951,39	946,63	94,66		
Mn	0,33	5,40	34,82	5,37			0,11	0,54	11,30	6,22	0,62		
Si										6,00	0,60		
S	0,042	0,69	0,280	0,04	0,010	0,01	1,760	8,61	9,35	0,47	0,047	7,95	1,92
P	0,028	0,46	0,040	0,01	0,013	0,02	0,048	0,23	0,71	0,71	0,071		
SiO <sub>2</sub>	8,12	132,86	24,10	3,71	1,20	1,43	4,25	20,78	158,78			145,93	35,23
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,66	27,16	4,00	0,62	1,10	1,31	2,53	12,37	41,46			41,46	10,01
CaO	7,57	123,86	4,10	0,63	38,50	45,80	0,27	1,32	171,61			171,61	41,44
MgO	1,13	18,49	1,50	0,23	12,60	14,99	0,17	0,83	34,54			34,54	8,34
FeO												6,12	1,48
MnO												6,57	1,59
C										39,97	3,997		
Итого										1000,0	100,0	414,16	100,0

Основность шлака  $(\text{CaO} + \text{MgO}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2) = 1,1001$  ед.

Относительная ошибка при определении основности составляет 0,01%, что находится в пределах допустимых значений (0,5%).

Количество элементов, переходящих в чугун и шлак определяется с учетом коэффициентов распределения (приложение Б).

Количество кремнезема в шлаке с учетом кремния, перешедшего в чугун рассчитывается следующим образом:

$$M_{\text{SiO}_2} = M_{\text{Si чугуна}} \cdot \frac{Mr_{\text{SiO}_2}}{Mr_{\text{Si}}},$$

$$M_{\text{SiO}_2} = 6 \cdot \frac{60}{28} = 12,86 \text{ кг.}$$

Количество углерода в чугуне:

$$M_C = 100 - (M_{Fe} - M_{Si} - M_{Mn} - M_S - M_P).$$

В шлак переходит кремнезема:

$$M_{SiO_2 \text{ шлака}} = M_{SiO_2 \text{ шлакообр.}} - M_{SiO_2},$$

$$M_{SiO_2 \text{ шлака}} = 158,78 - 12,86 = 145,93 \text{ кг.}$$

Количество FeO в шлаке определяется по формуле:

$$M_{FeO_{\text{шлак}}} = M_{Fe} \cdot \eta_{Fe_{\text{шлак}}} \cdot \frac{Mr_{FeO}}{Ar_{Fe}}.$$

Количество MnO в шлаке

$$M_{MnO_{\text{шлак}}} = M_{Mn} \cdot \eta_{Mn_{\text{шлак}}} \cdot \frac{Mr_{MnO}}{Ar_{Mn}}.$$

### 1.4.3 Определение температуры плавления шлака и его вязкости

Для оценки условий шлакового режима для шлака полученного состава необходимо определить температуру его кристаллизации, а также вязкость при данном температурном режиме плавки. Для этого используют тройные диаграммы температур плавления системы CaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> и вязкости.

Пересчет состава шлака на три компонента:

$$CaO + Al_2O_3 + SiO_2 = 41,44 + 10,01 + 35,23 = 86,68\%.$$

Состав тройной системы

$$(CaO) = 47,81\%; (SiO_2) = 40,64\%; (Al_2O_3) = 11,55\%.$$

Температура плавления шлака

Полученный шлак близок по составу к тройной эвтектике, имеющей 49% CaO, 40% SiO<sub>2</sub>, 11% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и температуру плавления 1310 °С, т.е. по температуре плавления полученный шлак удовлетворяет условиям плавки (приложение В).

Вязкость и устойчивость шлака

По диаграмме вязкости шлак полученного состава имеет вязкость 0,3 Пуаз (Н·с/м<sup>2</sup>), т.е. находится в пределах нормы (верхним пределом доменных шлаков на выпуске следует считать 0,5 Пуаз).

Плавкость шлака

Согласно диаграмме Гау-Бабю плавкость шлака составит 1515 кДж/кг, что также удовлетворяет исходным данным.

## 2 РАСЧЁТ СОСТАВА И КОЛИЧЕСТВА КОЛОШНИКОВОГО ГАЗА И ДУТЬЯ

Образующийся у фурм горновой газ проходит путь от горна до колошника, непрерывно меняя свой состав. На выходе из печи колошниковый газ содержит  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$ .

### 2.1 Баланс углерода

а) вносится коксом:

$$M_{\text{C к}} = M_{\text{к}} \cdot [\text{C}]_{\text{к}},$$

$$M_{\text{C к}} = 489 \cdot 0,8621 = 421,57 \text{ кг.}$$

б) растворяется в чугуна:

$$M_{\text{C чугуна}} = M_{\text{чугуна}} \cdot [\text{C}]_{\text{чугуна}},$$

$$M_{\text{C чугуна}} = 1000 \cdot 0,04036 = 40,36 \text{ кг.}$$

в) расходуется на образование метана по реакции:  $3\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CH}_4 + 2\text{CO}$ .

$$M_{\text{C}}^{\text{CH}_4} = M_{\text{C к}} \cdot [\text{C}]_{\text{CH}_4},$$

$$M_{\text{C}}^{\text{CH}_4} = 421,57 \cdot 0,008 = 3,37 \text{ кг.}$$

г) окисляется шихтой и дутьём:

$$M_{\text{C окисл}} = M_{\text{C кокса}} - M_{\text{C чугуна}} - M_{\text{C на CH}_4},$$

$$M_{\text{C окисл.}} = 421,57 - 40,36 - 3,37 = 377,84 \text{ кг.}$$

д) расходуется углерода на прямое восстановление кремния, марганца, фосфора и железа:

- на восстановление кремния по реакции  $\text{SiO}_2 + 2\text{C} = 2\text{CO} + \text{Si}$ ,

$$M_{\text{C}}^{\text{Si}} = M_{\text{Si}} \cdot \frac{2 \cdot Mr_{\text{C}}}{Mr_{\text{Si}}},$$

$$M_C^{Si} = 6 \cdot \frac{2 \cdot 12}{28} = 5,14 \text{ кг}$$

- на восстановление марганца по реакции  $MnO + C = Mn + CO$

$$M_C^{Mn} = M_{Mn} \cdot \frac{Mr_C}{Mr_{Mn}},$$

$$M_C^{Mn} = 6,22 \cdot \frac{12}{55} = 1,36 \text{ кг}$$

- на восстановление фосфора по реакции  $P_2O_5 + 5C = 2P + 5CO$

$$M_C^P = M_P \cdot \frac{5 \cdot Mr_C}{2 \cdot Mr_P},$$

$$M_C^P = 0,71 \cdot \frac{5 \cdot 12}{2 \cdot 31} = 0,69 \text{ кг}.$$

- на прямое восстановление железа по реакции  $FeO + C = Fe + CO$

$$M_C^{Fe} = M_{Fe} \cdot r_d \cdot \frac{Mr_C}{Mr_{Fe}},$$

$$M_C^{Fe} = 946,63 \cdot 0,35 \cdot \frac{12}{56} = 71 \text{ кг}.$$

- всего расходуется углерода на прямое восстановление:

$$M_{C_d} = M_C^{Si} + M_C^{Mn} + M_C^P + M_C^{Fe},$$

$$M_{C_d} = 5,14 + 1,36 + 0,69 + 71 = 78,19 \text{ кг}.$$

е) сгорает у фурм (окисляется дутьем):

$$M_{C_{\text{фурм}}} = M_{C_{\text{окисл.}}} - M_{C_d},$$

$$M_{C_{\text{фурм}}} = 377,84 - 78,19 = 299,65 \text{ кг}.$$

## 2.2 Расчет количества дутья

а) на сжигание углерода у фурм ( $2C + O_2 = 2CO$ ) требуется кислорода:

$$V_{O_2}^{C_{\text{фурм}}} = M_{C_{\text{фурм}}} \cdot \frac{22,4}{2 \cdot Mr_C},$$

$$V_{O_2}^{C_{\text{фурм}}} = 299,65 \cdot \frac{22,4}{2 \cdot 12} = 279,67 \text{ м}^3.$$

б) количество кислорода, необходимое для сжигания природного газа было определено ранее в пункте 1.3.3.

$$V_{O_2}^{\text{п.г.}} = 120 \cdot 0,64 = 76,8 \text{ м}^3.$$

в) содержание кислорода во влажном дутье:

$$\omega_{\text{вл.д}} = \omega \cdot (1 - f) + 0,5 \cdot f,$$

где 0,5 - количество кислорода в %, получающееся при разложении 1% влаги дутья по реакции  $\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + 0,5\text{O}_2$ .

$$\text{Тогда } \omega_{\text{вл.д}} = 0,24 \cdot (1 - 0,01) + 0,5 \cdot 0,01 = 0,243 \text{ или } 24,3\%,$$

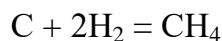
г) количество дутья:

$$V_{\text{д}} = \frac{V_{O_2}^{C_{\text{фурм}}} + V_{O_2}^{\text{п.г.}}}{\omega_{\text{вл.д}}}.$$

$$V_{\text{д}} = \frac{279,67 + 76,8}{0,243} = 1466,95 \text{ м}^3.$$

### 2.3 Количество и состав колошникового газа

1. Количество метана в колошниковом газе образующегося по реакции:



$$V_{\text{CH}_4} = M_{\text{C}}^{\text{CH}_4} \cdot \frac{22,4}{M_{\text{rC}}},$$

$$V_{\text{CH}_4} = 3,37 \cdot \frac{22,4}{12} = 6,29 \text{ м}^3.$$

Количеством метана, вносимым летучими кокса, пренебрегаем из-за незначительности величины.

2. Количество водорода в колошниковом газе.

а) количество водорода в газе образующегося при разложении природного газа и влаги дутья, расходуемого на сжигание природного газа (смотреть пункт 1.3.3):

$$V_{\text{H}_2 \text{ пр.гор}}^{\text{п.г.}} = 276,76 \text{ м}^3.$$

б) образуется водорода из влаги дутья, расходуемого на сжигание углерода кокса:

$$V_{H_2}^{C_k} = \frac{f \cdot V_{O_2}^{C_{\text{фурм}}}}{\omega_{\text{в.л.д.}}},$$

$$V_{H_2}^{C_k} = \frac{0,01 \cdot 279,67}{0,243} = 11,51 \text{ м}^3.$$

в) всего образуется водорода

$$V_{H_2}^{\text{д}} = V_{H_2}^{\text{п.г.}} + V_{H_2}^{C_k}$$

$$V_{H_2}^{\text{д}} = 276,76 + 11,51 = 288,27 \text{ м}^3.$$

г) часть водорода (40%) участвует в реакциях косвенного восстановления:

$$V_{H_2}^{\text{к.в.}} = V_{H_2}^{\text{ДУПЬЯ}} \cdot \eta_{H_2},$$

$$V_{H_2}^{\text{к.в.}} = 288,27 \cdot 0,4 = 115,31 \text{ м}^3.$$

д) количество водорода, переходящее в газ:

$$V_{H_2 \text{ газ}}^{\text{д}} = V_{H_2}^{\text{д}} - V_{H_2}^{\text{к.в.}},$$

$$V_{H_2 \text{ газ}}^{\text{д}} = 288,27 - 115,31 = 172,96 \text{ м}^3.$$

е) водород кокса:

- водород летучих веществ кокса:

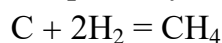
$$V_{H_2}^{\text{летучих}} = M_{\text{к}} \cdot [\text{летучие}]_{\text{кокса}} \cdot [H_2]_{\text{летучих}} \cdot \frac{22,4}{M_{r_{H_2}}},$$

$$V_{H_2}^{\text{летучих}} = 489 \cdot 0,01 \cdot 0,04 \cdot \frac{22,4}{2} = 2,19 \text{ м}^3.$$

- водород, содержащийся в метане летучих кокса не учитывается.

ж) водород, образующийся при разложении гидратной воды, не учитывается в расчетах из-за пренебрежительно малого его количества.

з) расходуется водорода на образование метана по реакции:



$$V_{H_2}^{CH_4} = V_{CH_4} \cdot 2,$$

$$V_{\text{H}_2}^{\text{CH}_4} = 6,29 \cdot 2 = 12,58 \text{ м}^3.$$

и) количество водорода в колошниковом газе:

$$V_{\text{H}_2}^{\text{к.г.}} = V_{\text{H}_2 \text{ газ}}^{\text{д}} + V_{\text{H}_2}^{\text{летучих}} - V_{\text{H}_2}^{\text{CH}_4},$$

$$V_{\text{H}_2}^{\text{к.г.}} = 172,96 + 2,19 - 12,58 = 162,57 \text{ м}^3.$$

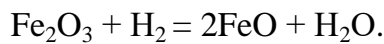
3. Количество двуокиси углерода в колошниковом газе.

а) количество  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в шихтовых материалах (учитывается только  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  рудной смеси, поскольку железо в золе кокса находится в виде  $\text{FeO}$ , а  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  образуется при сжигании кокса для определения содержания в нём золы) составляет:

$$\text{б) } M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^{\text{р.с.}} = M_{\text{р.с.}} \cdot [\text{Fe}_2\text{O}_3]_{\text{р.с.}}$$

$$M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^{\text{р.с.}} = 1636,22 \cdot 0,7409 = 1212,28 \text{ кг.}$$

в) часть  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  восстанавливается водородом по реакции:



Условно считаем, что весь водород, участвующий в реакциях косвенного восстановления, восстанавливает  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  до  $\text{FeO}$ . Количество  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  восстанавливаемое водородом составит:

$$M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^{\text{H}_2} = V_{\text{H}_2}^{\text{к.в.}} \cdot \frac{M_{\text{rFe}_2\text{O}_3}}{22,4},$$

$$M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^{\text{H}_2} = 115,31 \cdot \frac{160}{22,4} = 823,64 \text{ кг.}$$

г) образуется воды

$$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{к.в.}} = V_{\text{H}_2}^{\text{к.в.}} \cdot \frac{M_{\text{rH}_2\text{O}}}{22,4},$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{к.в.}} = 115,31 \cdot \frac{18}{22,4} = 92,66 \text{ кг.}$$

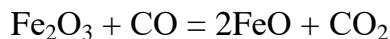
д) количество  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , восстанавливаемое оксидом углерода

$$M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^{\text{CO}} = M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^{\text{р.с.}} - M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^{\text{H}_2},$$

$$M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^{\text{CO}} = 1212,28 - 823,64 = 338,64 \text{ кг.}$$



е) образуется диоксида углерода при восстановлении по реакции:



$$V_{\text{CO}_2}^{\text{Fe}_2\text{O}_3} = M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}^{\text{CO}} \cdot \frac{22,4}{M_{\text{Fe}_2\text{O}_3}},$$

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{Fe}_2\text{O}_3} = 338,64 \cdot \frac{22,4}{160} = 54,41 \text{ м}^3.$$

ж) количество оксида углерода, образующееся при восстановлении железа из FeO по реакции ( $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$ )

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{FeO}} = M_{\text{Feчугуна}} \cdot R_i \cdot \frac{22,4}{M_{\text{Fe}}},$$

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{FeO}} = 946,63 \cdot 0,65 \cdot \frac{22,4}{56} = 246,12 \text{ м}^3.$$

з) образуется диоксида углерода от непрямого восстановления:

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{К.В.}} = V_{\text{CO}_2}^{\text{Fe}_2\text{O}_3} + V_{\text{CO}_2}^{\text{FeO}},$$

$$V_{\text{CO}_2}^{\text{К.В.}} = 54,41 + 246,12 = 300,53 \text{ м}^3.$$

4. Количество оксида углерода в колошниковом газе:

а) образуется оксида углерода от окисления углерода кокса шихтой и дутьём:

$$V_{\text{CO}}^{\text{ОКИСЛ.}} = M_{\text{C}_{\text{ОКИСЛ.}}} \cdot \frac{22,4}{M_{\text{C}}},$$

$$V_{\text{CO}}^{\text{ОКИСЛ.}} = 377,84 \cdot \frac{22,4}{12} = 705,3 \text{ м}^3.$$

б) образуется оксида углерода при горении 1 м<sup>3</sup> природного газа:

$$V_{\text{CO}}^{1\text{м}^3 \text{ П.Г.}} = \text{CH}_4 + 2 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 3 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 4 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 5 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + \text{CO} + \text{CO}_2,$$

$$V_{\text{CO}}^{1\text{м}^3 \text{ П.Г.}} = 0,9 + 2 \cdot 0,03 + 3 \cdot 0,01 + 4 \cdot 0,01 + 5 \cdot 0,05 + 0 + 0 = 1,28 \text{ м}^3.$$

в) из 120 м<sup>3</sup> природного газа образуется оксида углерода:

$$V_{\text{CO}}^{\text{п.г.}} = V_{\text{п.г.}} \cdot V_{\text{CO}}^{\text{1м}^3 \text{ п.г.}},$$

$$V_{\text{CO}}^{\text{п.г.}} = 120 \cdot 1,28 = 153,6 \text{ м}^3.$$

г) остаётся в газе оксида углерода после расхода части её на не прямое восстановление:

$$V_{\text{CO}}^{\text{к.г.}} = V_{\text{CO}}^{\text{ОКИСЛ}} + V_{\text{CO}}^{\text{п.г.}} - V_{\text{CO}_2}^{\text{к.в.}},$$

$$V_{\text{CO}}^{\text{к.г.}} = 705,3 + 153,6 - 300,53 = 558,37 \text{ м}^3.$$

## 5. Количество азота в колошниковом газе

а) содержание азота во влажном дутье:

$$[N_2]_{\text{вл.д.}} = [N_2]_{\text{с.д.}} \cdot (1 - f),$$

$$[N_2]_{\text{вл.д.}} = 76 \cdot (1 - 0,01) = 75,24\%.$$

б) дутье вносит азота:

$$V_{N_2}^{\text{вл.д.}} = V_{\text{д.}} \cdot [N_2]_{\text{вл.д.}},$$

$$V_{N_2}^{\text{вл.д.}} = 1466,95 \cdot 0,7524 = 1103,73 \text{ м}^3.$$

в) коксом вносится азота:

$$V_{N_2}^{\text{к.}} = M_{\text{к.}} \cdot [\text{летучие}]_{\text{к.}} \cdot [N_2]_{\text{летучих}} \cdot \frac{22,4}{M_{r_{N_2}}},$$

$$V_{N_2}^{\text{к.}} = 489 \cdot 0,01 \cdot 0,32 \cdot \frac{22,4}{28} = 1,25 \text{ м}^3.$$

г) всего азота в колошниковом газе:

$$V_{N_2}^{\text{к.г.}} = V_{N_2}^{\text{вл.д.}} + V_{N_2}^{\text{кокса}},$$

$$V_{N_2}^{\text{к.г.}} = 1103,73 + 1,25 = 1104,98 \text{ м}^3.$$

Данные о количестве и составе колошникового газа приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Состав колошникового газа

Компонент	Компоненты колошникового газа					Итого
	CO <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	
Количество, м <sup>3</sup>	300,53	558,37	1104,98	162,57	6,29	2132,74
Состав, %	14,09	26,18	51,81	7,62	0,29	100,00

### 3 РАСЧЕТ МАТЕРИАЛЬНОГО И ТЕПЛОВОГО БАЛАНСОВ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

#### 3.1 Материальный баланс доменной плавки

а) Масса дутья.

1 м<sup>3</sup> дутья весит:

$$M_{1\text{ м}^3 \text{ дутья}} = \frac{\omega \cdot (1-f) \cdot Mr_{\text{O}_2} + [\text{N}_2]_{\text{с.д.}} \cdot (1-f) \cdot Mr_{\text{N}_2} + f \cdot Mr_{\text{H}_2\text{O}}}{22,4},$$

$$M_{1\text{ м}^3 \text{ дутья}} = \frac{0,24 \cdot (1-0,01) \cdot 32 + 0,76 \cdot (1-0,01) \cdot 28 + 0,01 \cdot 18}{22,4} = 1,3 \text{ кг}$$

дутье весит:

$$M_{\text{дутья}} = M_{1\text{ м}^3 \text{ дутья}} \cdot V_{\text{дутья}},$$

$$M_{\text{дутья}} = 1,3 \cdot 1466,95 = 1889,43 \text{ кг.}$$

б) Масса природного газа

$$M_{\text{п.г.}} = 106,68 \text{ кг.}$$

в) Масса колошникового газа:

1 м<sup>3</sup> колошникового газа весит:

$$M_{1\text{ м}^3 \text{ к.г.}} = \frac{\text{CO} \cdot Mr_{\text{CO}} + \text{CO}_2 \cdot Mr_{\text{CO}_2} + \text{N}_2 \cdot Mr_{\text{N}_2} + \text{H}_2 \cdot Mr_{\text{H}_2} + \text{CH}_4 \cdot Mr_{\text{CH}_4}}{22,4},$$

$$M_{1\text{ м}^3 \text{ к.г.}} = \frac{0,2618 \cdot 28 + 0,1409 \cdot 44 + 0,5181 \cdot 28 + 0,0762 \cdot 2 + 0,0029 \cdot 16}{22,4} = 1,3 \text{ м}^3.$$

колошниковый газ весит:

$$M_{\text{к.г.}} = M_{1\text{ м}^3 \text{ к.г.}} \cdot V_{\text{к.г.}},$$

$$M_{\text{к.г.}} = 1,3 \cdot 2132,74 = 2772,56 \text{ кг.}$$

Данные материального баланса приведены в таблице 11.

Таблица 11 – Материальный баланс доменного процесса

Задано	кг	Получено	кг
Рудная смесь	1669,61	Чугуна	1000,00
Марганцевая руда	15,41	Шлака	414,16
Известняк	118,95	Газа сухого	2772,56
Кокс	504,12	Влаги и пыли	48,51
Дутья	1907,04	Влаги восстановления	92,66
Природного газа	106,68		
Итого	4321,81	Итого	4327,89

Невязка составляет 0,14%

Расчет считается верным, если невязка не превышает 0,5%.

### 3.2 Тепловой баланс доменной плавки

#### 3.2.1 Приход тепла

1. Тепло от сгорания углерода у фурм:

$$Q_{C \text{ фурм}} = \frac{117940}{M_{rC}} \cdot M_{C \text{ фурм}},$$

$$Q_{C \text{ фурм}} = \frac{117940}{12} \cdot 299,65 = 2945060,08 \text{ кДж}.$$

2. Тепло от окисления углерода прямого восстановления:

$$Q_{C_d} = \frac{117940}{M_{rC}} \cdot M_{C_d},$$

$$Q_{C_d} = \frac{117940}{12} \cdot 78,19 = 768477,38 \text{ кДж}.$$

3. Тепло догорания монооксида углерода в диоксид углерода

$$Q_{CO \rightarrow CO_2} = \frac{284260}{22,4} \cdot V_{CO_2},$$

$$Q_{CO \rightarrow CO_2} = \frac{284260}{22,4} \cdot 300,53 = 3813779,37 \text{ м}^3.$$

4. Тепло окисления водорода кислородом шихты

$$Q_{\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}} = \frac{242800}{M_{\text{rC}}} \cdot V_{\text{H}_2}^{\text{к.в.}},$$

$$Q_{\text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}} = \frac{242800}{22,4} \cdot 115,31 = 1249878,04 \text{ кДж}.$$

5. Тепло сгорания природного газа

$$Q_{\text{п.г.}} = V_{\text{п.г.}} (1660 \cdot \text{CH}_4 + 3040 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 3380 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 3460 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + 3625 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12}),$$

$$Q_{\text{п.г.}} = 120 \cdot (1660 \cdot 0,9 + 3040 \cdot 0,03 + 3380 \cdot 0,01 + 3460 \cdot 0,01 + 3625 \cdot 0,05) = 220182 \text{ кДж}$$

6. Физическое тепло дутья:

$$Q_{\text{д}} = V_{\text{с.д.}} \cdot W_{\text{O}_2, \text{N}}^{\text{т.д.}} + V_{\text{H}_2\text{O}_{\text{д}}} \cdot W_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{т.д.}};$$

$$V_{\text{с.д.}} = V_{\text{д}} \cdot (1-f), \quad V_{\text{H}_2\text{O}_{\text{д}}} = V_{\text{д}} \cdot f,$$

$$Q_{\text{д}} = 1466,95 \cdot 0,99 \cdot 1719,1 + 1466,95 \cdot 0,01 \cdot 2132,3 = 2527895,18 \text{ кДж}.$$

### 3.2.2 Расход тепла

1. Тепло диссоциации восстанавливаемых оксидов

а) оксид железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  диссоциирует по реакции:



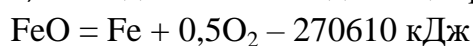
$$Q_{\text{дисс}}^{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{827020}{3 \cdot M_{\text{rO}}} \cdot M_{\text{O}_2}^{\text{Fe}_2\text{O}_3};$$

$$M_{\text{O}_2}^{\text{Fe}_2\text{O}_3} = ([\text{Fe}_2\text{O}_3]_{\text{р.с.}} \cdot M_{\text{р.с.}} + [\text{Fe}_2\text{O}_3]_{\text{м.р.}} \cdot M_{\text{м.р.}} + [\text{Fe}_2\text{O}_3]_{\text{изв}} \cdot M_{\text{изв}} + [\text{Fe}_2\text{O}_3]_{\text{к}} \cdot M_{\text{к}}) \cdot \frac{3 \cdot M_{\text{rO}}}{M_{\text{r}_{\text{Fe}_2\text{O}_3}}},$$

$$M_{\text{O}_2}^{\text{Fe}_2\text{O}_3} = (0,7409 \cdot 1636,22 + 0,042 \cdot 15,41 + 0,006 \cdot 118,95 + 0,0232 \cdot 489) \cdot \frac{3 \cdot 16}{160} = 367,46 \text{ кг};$$

$$Q_{\text{дисс}}^{\text{Fe}_2\text{O}_3} = \frac{827020}{3 \cdot 16} \cdot 367,49 = 6331699,58 \text{ кДж}.$$

б) оксид железа  $\text{FeO}$  диссоциирует по реакции:



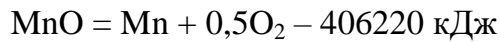
$$Q_{\text{дисс}}^{\text{FeO}} = \frac{270610}{M_{\text{rO}}} \cdot M_{\text{O}_2}^{\text{FeO}};$$

$$M_{\text{O}_2}^{\text{FeO}} = [\text{FeO}]_{\text{р.с.}} \cdot M_{\text{р.с.}} \cdot \frac{M_{\text{rO}}}{M_{\text{rFeO}}} - M_{\text{FeO шлака}} \cdot \frac{M_{\text{rO}}}{M_{\text{rFeO}}};$$

$$M_{\text{O}_2}^{\text{FeO}} = 0,0737 \cdot 1636,22 \cdot \frac{16}{72} - 6,12 \cdot \frac{16}{72} = 25,43 \text{ кг};$$

$$Q_{\text{дисс}}^{\text{FeO}} = \frac{270610}{16} \cdot 25,43 = 430100,77 \text{ кДж}.$$

в) оксид марганца  $\text{MnO}$  диссоциирует по реакции:



$$Q_{\text{дисс}}^{\text{MnO}} = \frac{406220}{M_{\text{rO}}} \cdot M_{\text{O}_2}^{\text{MnO}};$$

$$M_{\text{O}_2}^{\text{MnO}} = ([\text{MnO}]_{\text{р.с.}} \cdot M_{\text{р.с.}} + [\text{MnO}]_{\text{м.п.}} \cdot M_{\text{м.п.}}) \cdot \frac{M_{\text{rO}}}{M_{\text{rMnO}}} - M_{\text{MnO шлака}} \cdot \frac{M_{\text{rO}}}{M_{\text{rMnO}}},$$

$$M_{\text{O}_2}^{\text{MnO}} = (0,0043 \cdot 1636,22 + 0,035 \cdot 15,41) \cdot \frac{16}{71} - 7,4 \cdot \frac{16}{71} = 0,04 \text{ кг};$$

$$Q_{\text{дисс}}^{\text{MnO}} = \frac{406220}{16} \cdot 0,04 = 1015,55 \text{ кДж}.$$

г) оксид марганца  $\text{Mn}_3\text{O}_4$  диссоциирует по реакции:



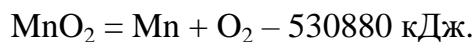
$$Q_{\text{дисс}}^{\text{Mn}_3\text{O}_4} = \frac{1450840}{4 \cdot M_{\text{rO}}} \cdot M_{\text{O}_2}^{\text{Mn}_3\text{O}_4};$$

$$M_{\text{O}_2}^{\text{Mn}_3\text{O}_4} = [\text{Mn}_3\text{O}_4]_{\text{р.с.}} \cdot M_{\text{р.с.}} \cdot \frac{4 \cdot M_{\text{rO}}}{M_{\text{rMn}_3\text{O}_4}} + [\text{Mn}_3\text{O}_4]_{\text{к.}} \cdot M_{\text{к.}} \cdot \frac{4 \cdot M_{\text{rO}}}{M_{\text{rMn}_3\text{O}_4}},$$

$$M_{\text{O}_2}^{\text{Mn}_3\text{O}_4} = 0 + 0,0015 \cdot 489 \cdot \frac{4 \cdot 16}{229} = 0,2 \text{ кг};$$

$$Q_{\text{дисс}}^{\text{Mn}_3\text{O}_4} = \frac{1450840}{4 \cdot 16} \cdot 0,2 = 4533,88 \text{ кДж}.$$

д) оксид марганца  $\text{MnO}_2$  диссоциирует по реакции:



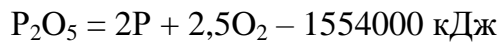
$$Q_{\text{дисс}}^{\text{MnO}_2} = \frac{530880}{4 \cdot M_{\text{rO}}} \cdot M_{\text{O}_2}^{\text{MnO}_2};$$

$$M_{O_2}^{MnO_2} = ([MnO_2]_{p.c.} \cdot M_{p.c.} + [MnO_2]_{m.p.} \cdot M_{m.p.} + [MnO_2]_k \cdot M_k) \cdot \frac{Mr_O}{Mr_{MnO_2}},$$

$$M_{O_2}^{MnO_2} = 0,508 \cdot 15,41 \cdot \frac{16}{87} = 1,44 \text{ кг};$$

$$Q_{\text{дисс}}^{MnO_2} = \frac{530880}{4 \cdot 16} \cdot 1,44 = 11944,8 \text{ кДж}.$$

е) оксид фосфора  $P_2O_5$  диссоциирует по реакции:



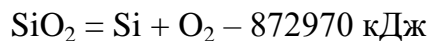
$$Q_{\text{дисс}}^{P_2O_5} = \frac{1554000}{5 \cdot Mr_O} \cdot M_{O_2}^{P_2O_5};$$

$$M_{O_2}^{P_2O_5} = ([P_2O_5]_{p.c.} \cdot M_{p.c.} + [P_2O_5]_k \cdot M_k + [P_2O_5]_{m.p.} \cdot M_{m.p.}) \cdot \frac{5 \cdot Mr_O}{Mr_{P_2O_5}},$$

$$M_{O_2}^{P_2O_5} = (0,00065 \cdot 1636,22 + 0,0011 \cdot 489 + 0,001 \cdot 15,41) \cdot \frac{5 \cdot 16}{142} = 0,91 \text{ кг}$$

$$Q_{\text{дисс}}^{P_2O_5} = \frac{1554000}{5 \cdot 16} \cdot 0,91 = 17676,75 \text{ кДж}.$$

ж) часть  $SiO_2$  диссоциирует по реакции



$$Q_{\text{дисс}}^{SiO_2} = \frac{872970}{Mr_O} \cdot M_{O_2}^{SiO_2};$$

$$M_{O_2}^{SiO_2} = M_{SiO_2} \cdot \frac{2 \cdot Mr_O}{Mr_{SiO_2}},$$

$$M_{O_2}^{SiO_2} = 12,86 \cdot \frac{2 \cdot 16}{60} = 6,86 \text{ кг};$$

$$Q_{\text{дисс}}^{SiO_2} = \frac{872970}{2 \cdot 16} \cdot 6,86 = 187142,94 \text{ кДж}.$$

з) общий расход тепла на диссоциацию оксидов

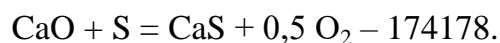
$$Q_{\text{дисс.}} = Q_{\text{дисс}}^{Fe_2O_3} + Q_{\text{дисс}}^{FeO} + Q_{\text{дисс}}^{MnO} + Q_{\text{дисс}}^{Mn_3O_4} + Q_{\text{дисс}}^{P_2O_5} + Q_{\text{дисс}}^{SiO_2},$$

$$Q_{\text{дисс.}} = 6331699,58 + 430100,77 + 1015,55 + 4533,8 + 11944,8 + \\ + 17676,75 + 187142,94 = 6984114,19 \text{ кДж}.$$

2. Тепло на перевод серы в шлак.

Для сульфидной и органической серы реакция имеет вид:





$$Q_{\text{S в шлак}}^{\text{сульфидной}} = \frac{174178}{M_{\text{rS}}} \cdot M_{\text{S в шлак}}^{\text{сульфидной}},$$

$$Q_{\text{S в шлак}} = \frac{174178}{32} \cdot 7,95 = 43272,35 \text{ кДж}.$$

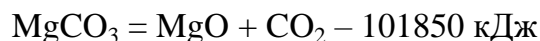
Для сульфатной серы реакция:  $\text{CaSO}_4 = \text{CaS} + 2\text{O}_2 - 921178 \text{ кДж}$

$$Q_{\text{S в шлак}}^{\text{сульфатной}} = \frac{921178}{M_{\text{rS}}} \cdot M_{\text{S в шлак}}^{\text{сульфатной}}.$$

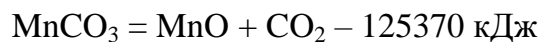
Сульфатная сера в составе шихтовых материалов отсутствует.

### 3. Тепло на разложение карбонатов.

Так как карбонаты в доменной печи разлагаются полностью, то по их количеству в шихте можно определить затраты тепла на реакции разложения:



$$Q_{\text{MgCO}_3} = \frac{101850}{M_{\text{rCO}_2}} \cdot M_{\text{CO}_2}^{\text{MgCO}_3},$$



$$Q_{\text{MnCO}_3} = \frac{125370}{M_{\text{rCO}_2}} \cdot M_{\text{CO}_2}^{\text{MnCO}_3},$$



$$M_{\text{CaCO}_3}^{\text{CO}_2} = [\text{п.п.п.}]_{\text{CaCO}_3} \cdot M_{\text{изв}},$$

$$M_{\text{CaCO}_3}^{\text{CO}_2} = 0,459 \cdot 118,95 = 54,6 \text{ кг};$$

$$Q_{\text{CaCO}_3} = \frac{101850}{M_{\text{rCO}_2}} \cdot M_{\text{CO}_2}^{\text{CaCO}_3},$$

$$Q_{\text{CaCO}_3} = \frac{101850}{44} \cdot 54,6 = 126386,59 \text{ кДж}.$$

### 4. Расход тепла на разложение углекислоты флюса и летучих

В приходной части баланса учтено тепло от реакций прямого восстановления, поэтому здесь следует выделить расход тепла на диссоциацию части  $\text{CO}_2$  флюса и летучих (пропорционально  $r_d$ ).

Часть  $\text{CO}_2$  флюса и летучих разлагается по реакции:



$$M_{\text{O}_2}^{\text{ф.л.}} = (M_{\text{изв}} \cdot [\text{CO}_2]_{\text{изв}} + M_{\text{к}} \cdot [\text{CO}_2]_{\text{к}}) \cdot \frac{Mr_{\text{O}_2}}{Mr_{\text{CO}_2}};$$

$$Q_{\text{CO}_2}^{\text{ф.л.}} = \frac{284260}{2 \cdot Mr_{\text{O}_2}} \cdot M_{\text{CO}_2}^{\text{ф.л.}} \cdot r_d \cdot 0,01,$$

$$M_{\text{CO}_2}^{\text{ф.л.}} = (118,95 \cdot 0,459 + 489 \cdot 0,29 \cdot 0,01) \cdot \frac{32}{44} = 40,74 \text{ кг};$$

$$Q_{\text{CO}_2}^{\text{ф.л.}} = \frac{284260}{32} \cdot 40,74 \cdot 0,35 \cdot 0,01 = 1266,64 \text{ кДж}.$$

5. Расход тепла на разложение влаги дутья.

Водяной пар полностью диссоциирует в фурменной зоне печи:



$$Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{д}} = \frac{242800}{Mr_{\text{H}_2\text{O}}} \cdot V_{\text{вл.д}};$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}^{\text{д}}} = V_{\text{д}} \cdot f,$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{д}} = \frac{242800}{18} \cdot 1466,95 \cdot 0,01 = 197875,26 \text{ кДж}.$$

6. Расход тепла на выделение и испарение гидратной влаги.

На разложение гидратов и испарение воды расходуется 4200 кДж/кг.

$$Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гидрат}} = 4200 \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гидрат}};$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гидрат}} = [\text{п.п.п.}]_{\text{р.с.}} \cdot M_{\text{р.с.}} + [\text{п.п.п.}]_{\text{м.р.}} \cdot M_{\text{м.р.}},$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гидрат}} = 0,07 \cdot 15,41 = 1,08 \text{ кг};$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гидрат}} = 4200 \cdot 1,08 = 4536 \text{ кДж}.$$

7. Затраты тепла на испарение гигроскопической влаги.

Здесь учитывается нагрев гигроскопической влаги до 100 °С и её испарение, что требует 2474 кДж/кг.

$$Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гигр}} = 2474 \cdot M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гигр}}.$$

Количество гигроскопической влаги:

$$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гигр}} = \frac{M_{\text{р.с.}}}{1 - [\text{H}_2\text{O}]_{\text{р.с.}}^{\text{гигр}}} \cdot [\text{H}_2\text{O}]_{\text{р.с.}}^{\text{гигр}} + \frac{M_{\text{Мп руды}}}{1 - [\text{H}_2\text{O}]_{\text{Мп руды}}^{\text{гигр}}} \cdot [\text{H}_2\text{O}]_{\text{Мп руды}}^{\text{гигр}} + \frac{M_{\text{к}}}{1 - [\text{H}_2\text{O}]_{\text{к}}^{\text{гигр}}} \cdot [\text{H}_2\text{O}]_{\text{к}}^{\text{гигр}}.$$

В данном примере гигроскопическая влага имеется в рудной смеси и коксе).

$$M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гигр}} = \frac{1636,22}{1 - 0,0065} \cdot 0,0065 + \frac{15,41}{1 - 0,06} \cdot 0,06 + \frac{420}{1 - 0,02} \cdot 0,02 = 20,26 \text{ кг};$$

$$Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гигр}} = 2474 \cdot 20,26 = 50123,24 \text{ кДж}.$$

8. Тепло, уносимое чугуном.

Теплосодержание чугуна можно определять по следующим формулам:

$$Q'_{\text{ч}} = M_{\text{ч}} \cdot Q_{\text{ч}},$$

$$Q'_{\text{ч}} = 1000 \cdot 1205,4 = 1205400 \text{ кДж}.$$

9. Тепло, уносимое шлаком:

$$Q'_{\text{ш}} = M_{\text{ш}} \cdot Q_{\text{ш}},$$

$$Q'_{\text{ш}} = 414,16 \cdot 1700 = 704072 \text{ кДж}.$$

10. Унос тепла колошниковым газам:

$$Q_{\text{к.г.}} = (V_{\text{CO}}^{\text{к.г.}} + V_{\text{N}_2}^{\text{к.г.}} + V_{\text{H}_2}^{\text{к.г.}}) \cdot Q_{\text{O,N}}^{\text{тк}} + V_{\text{CO}_2}^{\text{к.г.}} \cdot Q_{\text{CO}_2}^{\text{тк}} + V_{\text{CH}_4}^{\text{к.г.}} \cdot Q_{\text{CH}_4}^{\text{тк}} + V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{к.г.}} \cdot Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{тк}},$$

где  $Q_{\text{O,N}}^{\text{тк}}$ ,  $Q_{\text{CO}_2}^{\text{тк}}$ ,  $Q_{\text{CH}_4}^{\text{тк}}$ ,  $Q_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{тк}}$  - теплосодержание компонентов колошникового газа при температуре 300 °С (приложение).

Тогда

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{к.г.}} = \frac{22,4}{M_{\text{H}_2\text{O}}} (M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{к.в.}} + M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гигр}} + M_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{гидрат}}),$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{к.г.}} = \frac{22,4}{18} (92,66 + 1,08 + 20,26) = 141,87 \text{ м}^3;$$

$$Q_{\text{к.г.}} = (558,37 + 1104,98 + 162,57) \cdot 395,23 + 300,53 \cdot 558,94 + 6,29 \cdot 565,64 + 141,87 \cdot 463,48 = 958948,38 \text{ кДж}.$$

Результаты расчетов теплового баланса сведены в таблицу 12.

Таблица 12 – Тепловой баланс доменной плавки

	Статья баланса	кДж	%
<b>Приход тепла</b>			
1	Окисление углерода фурм	2945060,08	25,55
2	Окисление углерода прямого восстановления	768477,38	6,67
3	Окисление СО до СО <sub>2</sub>	3813779,37	33,09
4	Окисление водорода	1249878,04	10,84
5	Окисление природного газа	220182,00	1,91
6	Физическое тепло дутья	2527895,18	21,93
	<b>Итого</b>	<b>11525272,05</b>	<b>100,00</b>
<b>Расход тепла</b>			
1	Диссоциация оксидов	6984114,19	60,60
2	Перевод серы в шлак	43272,35	0,38
3	Разложение влаги дутья	197875,26	1,72
4	Разложение карбонатов	126386,59	1,10
5	Разложение уголекислоты флюса и летучих	1266,64	0,01
6	Испарение гидратной влаги	4536,00	0,04
7	Испарение гигроскопической влаги	50123,24	0,43
8	Тепло уносимое чугуном	1205400	10,46
9	Тепло уносимое шлаком	704072	6,11
10	Тепло уносимое колошниковым газом	958948,38	8,32
11	Невязка и тепловые потери	1249277,40	10,84
	<b>Итого</b>	<b>11525272,05</b>	<b>100,00</b>

К тепловым потерям относится тепло, уносимое охлаждающей водой, а также наружные тепловые потери через стены излучением и конвекцией и через фундамент теплопроводностью. В практике расчетов величину тепловых потерь находят по разности прихода и известных статей расхода тепла. В число потерь входит и величина невязки баланса. Так как истинное значение невязки баланса неизвестно, неопределенными остаются и тепловые потери.

При расчетах полагают, что величина тепловых потерь с невязкой должна составлять для передельного чугуна 4-12%, для литейного чугуна – 8-15%.

Тепловые потери данного расчета находятся в пределах нормы.

### 3.2.3 Показатели тепловой работы доменной печи

1. Коэффициент полезного действия тепла:

$$\eta_Q = \frac{Q_{\text{полез}}}{Q_{\text{прих}}} \cdot 100 ;$$

$$Q_{\text{полез}} = Q_{\text{прих}} - Q_{\text{к.г.}} - Q_{\text{потерь}} ,$$

$$Q_{\text{полез}} = 11525272,05 - 958948,38 - 1249277,40 = 9317046,27 \text{ кДж} ;$$

$$\eta_Q = \frac{9317046,27}{11525272,05} \cdot 100 = 80,84\% .$$

## 2. Коэффициент использования тепловой энергии углерода.

Это отношение количества тепла, полученного от горения углерода до СО и СО<sub>2</sub> к теплопроводной способности всего сгоревшего в печи углерода (если бы горение происходило до СО<sub>2</sub>):

$$\eta_C = \frac{Q_{C \rightarrow CO_2} + Q_{C \rightarrow CO}}{Q_{C \rightarrow CO_2} + Q_{C \rightarrow CO} \cdot \frac{33261}{9797}} ;$$

$$Q_{C \rightarrow CO_2} = (V_{CO_2}^{к.г.} - M_{изв} \cdot [CO_2]_{изв} \cdot \frac{22,4}{44}) \cdot 17955 ,$$

$$Q_{C \rightarrow CO_2} = 308,62 \cdot 17955 = 5541272,1 \text{ кДж};$$

$$Q_{C \rightarrow CO} = V_{CO}^{к.г.} \cdot 5266,8 ,$$

$$Q_{C \rightarrow CO} = 440,04 \cdot 5266,8 = 2317602,67 \text{ кДж};$$

$$\eta_C = \frac{5541272,1 + 2317602,67}{5541272,1 + 2317602,67 \cdot \frac{33261}{9797}} = 0,5861 \text{ или } 58,61\% .$$

## 4 УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

### 4.1 Общие требования к оформлению

1 Текст записки пишется в безличной форме.

2 Текст может быть написан чёрной или синей пастой (чернилами) или в печатном виде на одной стороне листа белой бумаги формата А4 через полтора межстрочных интервала (8 мм). Нельзя сочетать оба способа: написание и печать. Высота букв и цифр должна быть не менее 2,5 мм (кегель не менее 12 пт).

3 Текст следует писать (печатать), соблюдая следующие размеры полей: левое – не менее 20 мм, правое – не менее 10 мм, верхнее – не менее 20 мм, нижнее – не менее 20 мм.

4 Не разрешается

– применять сокращения слов и словосочетаний, кроме установленных ГОСТ 7.12–93 [7];

– применять произвольные словообразования;

– сокращать обозначения физических величин, если они употребляются без цифр, за исключением физических величин в головках и боковиках таблиц и в расшифровках буквенных обозначений, входящих в формулы и рисунки;

– употреблять математические знаки без числовых значений, например, " $\leq$ " (не более), " $\geq$ " (не менее), " $=$ " (равно), " $\neq$ " (не равно), а также знаки № (номер) и % (процент);

5 Текст основной части работы делят на разделы (законченные части работы), подразделы, пункты, подпункты.

Разделы, подразделы должны иметь заголовки. Пункты и подпункты, как правило, заголовков не имеют.

Каждый раздел начинают с новой страницы.

6 Правила для всех заголовков:

– переносы слов в заголовках не допускаются;

– точку в конце заголовка не ставят; если заголовок состоит из двух или нескольких предложений, то их разделяют точкой;

– все заголовки должны быть помещены в содержание работы;

– расстояние (интервал) между заголовками и заголовком и текстом должно быть в два раза больше, чем между строчками текста;

– при переносе текста на следующую страницу нельзя оставлять на предыдущей странице только заголовок подраздела или пункта, необходимо поместить в конце предыдущей страницы хотя бы одну строку текста.

### 4.2 Нумерация

1 Страницы нумеруют арабскими цифрами. Титульный лист включают в общую нумерацию, но на нем номер страницы не ставят. На последующих листах номер про-

ставляют в центре нижней части листа без точки и дополнительных знаков (прочерков и т.п.). Нумерация страниц основной части и приложений, входящих в состав работы, должна быть сквозной.

2 Разделы, подразделы, пункты и подпункты следует нумеровать арабскими цифрами без точки в конце. Разделы записываются по центру прописными буквами, подразделы с абзацного отступа и с прописной буквы (остальные буквы строчные). Разделы и подразделы не подчеркиваются, не печатаются курсивом. Точка в конце раздела или подраздела не ставится. Разделы должны иметь порядковую нумерацию в пределах всего текста, за исключением приложений.

Не нумеруют такие разделы, как **Содержание, Введение, Заключение (Выводы), Список использованных источников.**

Пункты нумеруют арабскими цифрами в пределах каждого подраздела. Номер пункта состоит из номеров раздела, подраздела и пункта, разделенных точками, например, "1.2.3" (третий пункт второго подраздела первого раздела).

3 Формулы, рисунки, таблицы (отдельно по каждой категории) следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией по всей работе, кроме приложений. Рисунки, таблицы, формулы, помещаемые в приложениях, должны нумероваться отдельно в пределах каждого приложения с добавлением перед каждой цифрой обозначения приложения. Например, «Рисунок Б.1» – первый рисунок второго приложения; «формула (А.12)» – двенадцатая формула первого приложения.

4 Нумерация ссылок на источники должна быть сквозной в пределах всего текста.

### 4.3 Таблицы

1 Цифровой материал оформляют в виде таблиц в соответствии с примерами из настоящих указаний. Структура таблицы приведена на рисунке 1.

Таблица \_\_\_\_\_ – Наименование таблицы

Головка	Заголовок граф (колонок)	
	Подзаголовок граф	Подзаголовок граф
Строка 1		
Строка 2		
Строка 3		

Рисунок 1 – Структура таблицы

2 Таблицу, в зависимости от её размера, помещают под текстом, в котором впервые дана ссылка на неё или на следующей странице. Таблицу размещают таким образом, чтобы её можно было читать без поворота или с поворотом текста по часовой стрелке.

3 Каждая таблица должна иметь название. Название таблицы следует помещать над таблицей слева, без абзацного отступа в одну строку с её номером через тире. Слово «Таблица» и её название начинают с прописной буквы. Название не подчёркивают. Переносы слов в названии не допускаются.

4 Заголовки граф таблицы должны начинаться с прописной буквы, а подзаголовки граф – со строчной буквы, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной буквы, если они имеют самостоятельное значение. В конце заголовков и подзаголовков таблиц точки не ставят. Заголовки и подзаголовки граф указывают в единственном числе.

5. Таблица состоит из головки, где помещают название граф (колонок), и боковика, где помещают название строк (см. рисунок 1). Таблицу заполняют только горизонтально. Слова в таблице не сокращают.

Делить заголовки боковика и граф диагональными линиями не допускается.

6 В таблице не разрешается:

– помещать графу "Номер по порядку (или № п/п)". При необходимости нумерации показателей, параметров или других данных порядковые номера указывают в боковике таблицы перед их наименованием;

– помещать колонку (графу) «Единица физической величины». Единицу физической величины вписывают в колонку, строку или в наименование таблицы.

7 Если повторяющийся в таблице текст состоит из одного слова, его допускается заменять кавычками; если из двух и более слов, то при первом повторении их заменяют словами «То же», а далее – кавычками.

Заменять кавычками повторяющиеся цифры, математические знаки, знаки процента и номера, обозначение марок материалов, типоразмеров изделий, обозначение нормативных документов не допускается. Если цифровые данные в какой-либо строке таблицы не приводят, то в ней ставят прочерк.

8 Если цифровые данные в графах таблицы выражены в различных единицах физических величин, то их указывают в заголовке каждой графы после наименования величины через запятую.

Если все параметры, размещённые в таблице, выражены в одной и той же единице физической величины, то её обозначение помещают над таблицей справа, например, "В миллиметрах".

Если в таблице помещены графы с параметрами, выраженными преимущественно в одной единице физической величины, но есть показатели с параметрами, выраженными в других единицах, то над таблицей следует писать наименование преобладающего показателя и обозначение его физической величины, например, "Размеры в миллиметрах", а сведения о других единицах дают в заголовках соответствующих граф.

Если все данные в строке приведены для одной физической величины, то обозначение единицы этой величины указывают в соответствующей строке боковика таблицы после наименования величины через запятую.

9 Если строки или графы таблицы выходят за формат страницы, её делят на части. При переносе таблицы на другой лист помещают заголовок только над её первой ча-



стью. Слово «Таблица» указывают один раз слева над первой частью таблицы, над другими частями таблицы слева пишут слова «Продолжение таблицы» с указанием номера таблицы.

При переносе таблицы с большим количеством строк на другую страницу необходимо:

– после головки таблицы обязательно сделать строку с номерами граф (колонок), т.е. пронумеровать графы. Для этого на листе, где начинается таблица, под ее головкой помещается дополнительная строка высотой не менее 8 мм с номерами граф таблицы (арабские цифры)

– в первой части таблицы нижнюю горизонтальную линию, ограничивающую таблицу, не проводят;

– на последующей странице слева вверху помещают слова «Продолжение таблицы ...», повторяют строку с номерами граф, помещают оставшиеся строки, закрывают таблицу горизонтальной чертой.

Перенос таблицы можно делать столько раз, сколько требуется.

10 Если в тексте работы одна таблица, то она должна быть обозначена «Таблица 1». На все таблицы в тексте должны быть приведены ссылки. При этом слово «таблица» пишут полностью с указанием её номера, например, «...в таблице 1». Повторные ссылки следует давать с сокращенным словом «смотри», например, «...см. таблицу 1».

#### 4.4 Формулы и уравнения

1 Уравнения и формулы следует выделять из текста в отдельную строку. Выше и ниже каждой формулы или уравнения должно быть оставлено не менее одной свободной строки.

Если уравнение не умещается в одну строку, то оно должно быть перенесено после знака равенства (=) или после знаков плюс (+), минус (-), умножения (×), деления (:) или других математических знаков, причём знак в начале следующей строки повторяют. При переносе формулы на знаке, символизирующем операцию умножения, применяют знак «х».

Пояснение значений символов и числовых коэффициентов, входящих в формулу, если они не пояснены ранее в тексте, следует приводить непосредственно под формулой в той же последовательности, в которой они даны в формуле.

*Пример*

Плотность каждого образца вычисляют по формуле:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность образца, кг/м<sup>3</sup>;

$m$  – масса образца, кг;

$V$  – объём образца, м<sup>3</sup>.

2 Формулы в тексте следует нумеровать арабскими цифрами в круглых скобках в крайнем правом положении на строке.

3 Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в круглых скобках, например, «...в формуле (1)».

4 При выполнении математических расчётов уравнение следует нумеровать только в том случае, когда на него дается ссылка в тексте работы. Нумерация расчётных уравнений сквозная по всей работе, кроме приложений.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Metallurgiya chuguna. / Vegman E.F., Zherebin B.N., Poxvisnev A.N. i dr. – M.: Metallurgiya, 1989. – 512 s.
2. Vegman E.F. Kratkiy spravochnik domenщика. M.: Metallurgiya, 1984. – 256 s.
3. Domennoye proizvodstvo. Spravochnik. / pod red. E.F. Vegmana. M.: Metallurgiya, 1989. – 496 s.
4. Volkov Yu.P., Shparber L.Ya., Gусarov A.K. Tekhnolog-domenщик. M.: Metallurgiya, 1986. – 263 s.

**Приложение А**  
**Варианты заданий для расчета**

Таблица А1 – Состав чугуна

Вариант	Состав чугуна, %					
	Si	Mn	P	S	C	Fe
1	0,6	0,6	0,1	0,04	4,2	94,46
2	0,7	0,8	0,1	0,04	4,15	94,21
3	2,4	0,9	0,12	0,04	3,5	93,04
4	0,9	0,7	0,1	0,04	4,03	94,23
5	1,0	1,1	0,1	0,03	4,06	93,71
6	0,5	1,2	0,08	0,03	4,1	94,09
7	0,5	1,3	0,08	0,04	4	94,08
8	0,6	1,4	0,08	0,04	4,2	93,68
9	0,6	1,5	0,08	0,04	4,15	93,63
10	1,5	0,5	0,1	0,03	4	93,87
11	0,7	0,9	0,15	0,03	4,05	94,17
12	0,7	0,8	0,15	0,02	4,04	94,29
13	0,7	0,7	0,15	0,02	4,08	94,35
14	0,8	0,6	0,15	0,04	4,02	94,39
15	0,8	0,5	0,14	0,045	4	94,52
16	2	0,8	0,1	0,04	3,8	93,26
17	0,9	0,7	0,14	0,045	4,14	94,08
18	0,9	0,8	0,14	0,035	4,16	93,97
19	0,9	0,9	0,14	0,03	4,17	93,86
20	0,5	1	0,11	0,035	4,22	94,14
21	0,6	0,9	0,11	0,035	4,25	94,11
22	1,6	0,5	0,08	0,03	3,7	94,09
23	0,6	0,7	0,11	0,04	4	94,55
24	1	0,6	0,11	0,04	4,14	94,11
25	0,8	0,5	0,12	0,04	4,02	94,52
26	0,9	0,6	0,12	0,03	4,03	94,32
27	0,5	0,7	0,12	0,04	4,04	94,60
28	2,8	0,8	0,1	0,04	3,5	92,76
29	0,9	0,9	0,12	0,04	4,06	93,98
30	0,7	1	0,15	0,04	4,07	94,04

Таблица А2 – Соотношение шихтовых материалов, расход природного газа и основность шлака

Вариант	Количество агломерата в шихте, %	Количество окатышей в шихте, %	Номер кокса	Номер природного газа	Расход природного газа, м <sup>3</sup> /т	Основность шлака
1	60	40	1	1	100	1,0
2	55	45	2	2	100	1,02
3	50	50	1	1	100	1,0
4	40	60	2	2	110	1,05
5	30	70	1	1	110	1,08
6	65	35	2	2	110	1,1
7	75	25	1	1	120	1,12
8	85	15	2	2	120	1,06
9	78	22	1	1	120	1,15
10	90	10	2	2	115	0,95
11	80	20	1	1	115	1,2
12	70	30	2	2	115	1,25
13	95	5	1	1	125	1,14
14	82	18	2	2	125	1,16
15	72	28	1	1	125	1,22
16	58	42	2	2	95	1,0
17	45	55	1	1	95	1,02
18	52	48	2	2	95	1,04
19	65	35	1	1	100	1,05
20	75	25	2	2	100	1,08
21	85	15	1	1	100	1,1
22	95	5	2	2	130	1,0
23	84	16	1	1	130	1,06
24	92	8	2	2	130	1,15
25	76	24	1	1	120	1,18
26	46	54	2	2	120	1,2
27	48	52	1	1	120	1,25
28	52	48	2	2	125	0,95
29	62	38	1	1	125	1,16
30	71	29	2	2	125	1,22

Таблица А3 – Химический состав железорудных материалов, %

ЖРМ	Fe	Mn	S	P	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	FeS	SO <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> O
Агломерат	53,20	0,09	0,028	0,044	62,11	12,50	12,86	0,40	10,50	1,30	0,11	0,10	0,05	0,07	0,54
Окатыши	62,20	0,07	0,020	0,039	85,52	3,00	4,40	0,40	4,00	2,10	0,09	0,09	-	0,05	-

Таблица А4 – Химический состав марганцевой руды

	Руда	Mn	MnO	MnO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	п.п.п.	H <sub>2</sub> O
1	Никопольская	38,06		60,20	5,00	20,00	6,00	2,00	0,30		0,50	6,00	19,00
2	Чиатурская	37,38	5,00	53,00	2,10	28,00	3,00	2,00	1,40	0,15	0,35	5,00	12,00
3	Полуночная	26,30	16,00	22,00	6,00	32,00	5,00	3,00	2,00	1,00	0,40	12,60	20,00
4	Марсетская	20,00	7,00	23,00	10,40	33,00	6,00	4,00	3,00	0,50	1,00	12,10	10,00
5	Атасуйская	35,00	4,00	50,30	3,70	24,10	4,50	4,10	1,50	0,70	0,10	7,00	
6	Усунская	25,00		39,60	7,00	25,00	2,00	7,00	2,00	2,00	0,40	15,00	10,00

Таблица А5 – Химический состав флюсов

Вид известняка	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>
Аккермановский	54,00	0,70	1,70	0,50	0,50	0,03	0,04	42,53
Еленовский	53,50	0,85	1,75	0,80	0,70	0,03	0,03	42,34
Барсуковский	54,50	0,78	0,79	0,12	0,55		0,13	43,13

Таблица А6 – Химический состав кокса и летучих веществ

Номер	Состав кокса				
	Зола А <sup>с</sup>	Сера S <sup>с</sup>	Летучие	Углерод С <sup>с</sup>	H <sub>2</sub> O <sub>гигр</sub>
1	14,20	0,44	1,91	83,45	2,5
2	10,20	1,81	1,20	86,79	3,10
	Состав летучих кокса (в соответствии с номером кокса)				
	CO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
1	29,0	34,0	1,0	4,0	32,0
2	27	32	1,6	3,8	35,6

Таблица А7 – Химический состав золы кокса (в соответствии с номером кокса)

Номер	Fe	Mn	S	P	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
1	7,98	0,54	1,280	0,306	11,40	0,70	0,00	5,90	2,00	49,20	26,90	0,70	3,2
2	17,78	1,14	0,816	0,358	25,4	0	1,58	2,80	2,16	42,80	22,40	0,82	2,04

Таблица А8 – Состав природного газа

Номер	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
1	90	4	1,0	0,	0,6
2	92	4,6	0,9	0,8	0,2

Таблица А9 – Параметры дутья и степень прямого восстановления

Вариант	O <sub>2</sub> в дутье, %	Влажность дутья, %	Температура дутья, °С	Степень прямого восстановления r <sub>d</sub> , %
1-3	23	1,0	1250	28
4-6	24	1,1	1200	30
7-9	25	1,2	1150	32
10-12	26	1,3	1010	34
13-15	27	1,4	1050	27
16-18	28	1,5	1100	29
19-21	24	1,2	1250	31
22-24	25	1,3	1100	33
25-27	26	1,4	1150	35
28-30	30	1,0	1100	30

Таблица А10 – Температурные параметры процесса и вынос материалов

Вариант	Вынос пыли от кокса, %	Вынос рудной части шихты, %	T <sub>колош. газа</sub> , °С	T <sub>чугуна</sub> , °С	T <sub>шлака</sub> , °С
1.	0,5	2,0	200	1400	1450
2.	0,6	2,1	200	1400	1450
3.	0,7	2,2	200	1405	1450
4.	0,8	2,3	250	1400	1460
5.	0,9	2,4	250	1405	1460
6.	1,0	2,5	250	1410	1460
7.	1,1	2,6	300	1415	1470
8.	1,2	2,7	300	1410	1470
9.	1,3	2,8	300	1415	1470
10.	1,4	2,9	350	1410	1480
11.	1,5	3,0	350	1420	1480
12.	1,6	3,1	350	1425	1480
13.	1,7	3,2	225	1420	1490
14.	1,8	3,3	225	1425	1490
15.	0,4	3,4	225	1420	1490
16.	0,3	3,5	325	1430	1500
17.	0,2	3,8	325	1435	1500
18.	0,1	4,0	325	1430	1500
19.	0	4,2	375	1435	1500
20.	0,5	4,4	375	1430	1480
21.	0,6	4,6	375	1140	1485
22.	0,7	4,8	315	1140	1485
23.	0,8	5,0	315	1145	1465
24.	0,9	3,6	315	1140	1465
25.	1,0	3,7	220	1445	1465
26.	1,1	3,8	220	1450	1460
27.	1,2	3,9	220	1455	1475
28.	1,3	4,0	260	1450	1475
29.	1,4	4,1	260	1455	1475
30.	1,5	5,2	260	1450	1495

## Приложение Б

### Справочные данные

Таблица Б1 – Коэффициенты распределения элементов

Элемент	Шлак	Газ
Fe	0,001–0,008	0
Mn	$\frac{0,25 - 0,50}{0,20 - 0,35^*}$	0
Cr	0,02–0,08	0
V	0,08–0,20	
Ni	0	0
Co, Cu, St, As	0	0
Zn	не более 0,05	0,9-1,0
Si	$\frac{0,92 - 0,98}{0,75 - 0,9}$	0
Ti	0,85–0,97	0
Ca, Ba, Mg, Al	1,0	0
P	0	0
S	$\frac{0,85 - 0,92}{0,86 - 0,88}$	$\frac{0,05 - 0,10}{0,10 - 0,15}$

\* - в знаменателе коэффициенты перехода для литейного чугуна.

Таблица Б2 – Примерные значения атомных масс элементов

Элемент	Округленное значение атомной массы	Элемент	Округленное значение атомной массы
Азот	14	Мышьяк	75
Алюминий	27	Натрий	23
Барий	137,4	Никель	59
Ванадий	51	Олово	119
Водород	1	Свинец	207
Железо	56	Сера	32
Калий	39	Титан	48
Кальций	40	Углерод	12
Кислород	16	Фосфор	31
Кобальт	59	Фтор	19
Кремний	28	Хлор	35,5
Магний	24,3	Хром	52
Марганец	55	Цинк	65,4
Медь	63,5		



Таблица Б3 – Энтальпия газов, кДж/м<sup>3</sup>

Газы	Температура, °С										
	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
Двухатомные	671,6	813,9	959,6	1107,4	1257,7	1409,7	1563,8	1719,1	1876,1	1920,9	2193,0
Водяной пар	795,1	968,8	1148,8	1334,3	1526,1	1722,9	1925,1	2132,3	2343,8	2559,0	2779,2

Таблица Б4 – Теплосодержание компонентов колошникового газа, кДж/м<sup>3</sup>

Газ	Температура, °С		
	200	300	400
Двухатомный газ (СО, О <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> ,H <sub>2</sub> )	261,26	395,23	531,72
СО <sub>2</sub>	357,55	558,94	772,04
СН <sub>4</sub>	351,69	565,64	806,38
Н <sub>2</sub> О	304,38	463,48	626,34



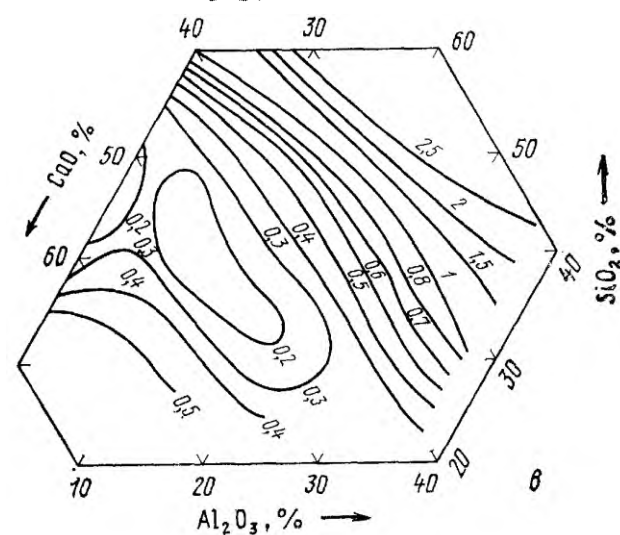
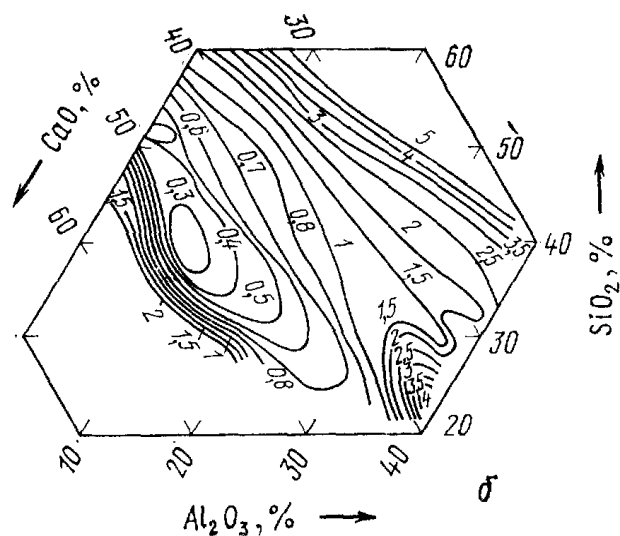
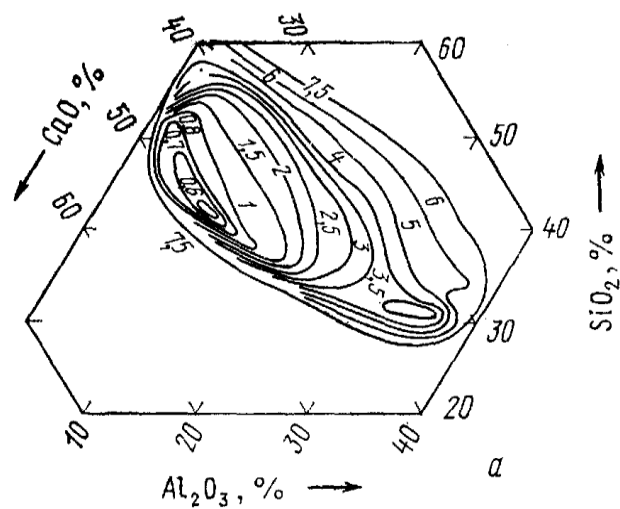


Рисунок В2 – Влияние химического состава на вязкость (пуаз) доменных шлаков в системе  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  при температуре 1400 °C (а), 1500 °C (б), 1600 °C (в) (диаграмма Мак-Кефери)

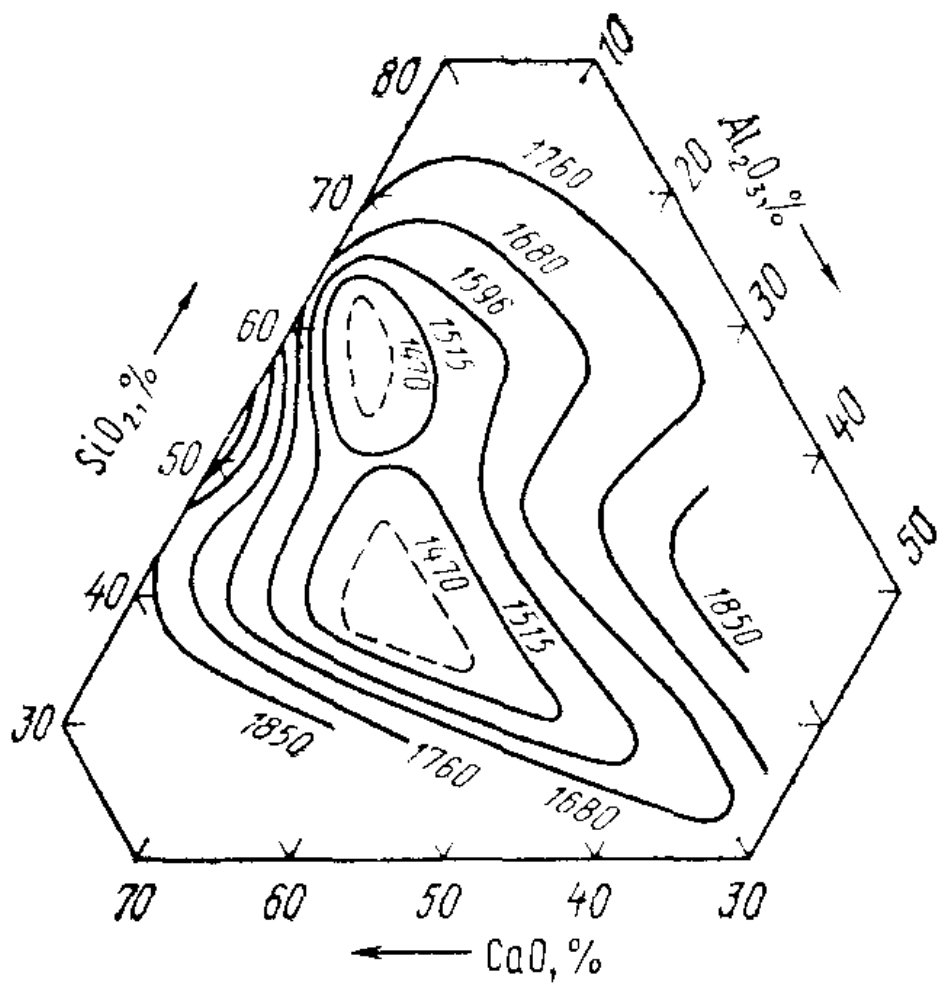


Рисунок В3 – Диаграмма плавкости доменных шлаков системы  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  (кДж/кг) (диаграмма Гау-Бабю)

БРАТКОВСКИЙ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**РАСЧЕТ СОСТАВА ШИХТЫ,  
МАТЕРИАЛЬНОГО И ТЕПЛОВОГО БАЛАНСОВ  
ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА**

Методические указания для выполнения  
курсовой работы по дисциплинам  
«Теория и технология окискования сырья и доменного производства»,  
«Экстракция черных металлов из природного сырья»  
для студентов, обучающихся по направлению  
подготовки бакалавров 22.03.02 Metallurgy,  
профиль «Metallurgy черных металлов»,  
всех форм обучения

Подписано в печать 16.12.2020 г.		
Формат 60x90 $\frac{1}{16}$ Рег. № 185	Печать цифровая Тираж 10 экз.	Уч.-изд.л. 3,81

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
Новотроицкий филиал  
462359, Оренбургская обл., г. Новотроицк, ул. Фрунзе, 8.  
E-mail: [nf@misis.ru](mailto:nf@misis.ru)  
Контактный тел. 8 (3537) 679729.





