

*НАВОЙСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ*  
*НАВОЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ*  
*ИНСТИТУТ*

**Химико – металлургический факультет**

**КАФЕДРА «МЕТАЛЛУРГИЯ»**

# **КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

по предмету «Металлургическая теплотехника»

На тему: «Печи для кислородно-факельной плавки  
медных концентратов»

Выполнил (а) : Махмудов А.Ж.

*Навои – 2013 год*

## Содержание

Введение .....	3
1. Теоретическая часть .....	5
1.1. Печи для кислородно-факельной плавки сульфидов на штейн .....	5
1.2. Теплогенерация и теплообмен в реакционной зоне печи .....	8
2. Технологические расчеты процесса кислородно-факельной плавки медного концентрата.....	11
2.1. Расчет состава шихты.....	11
2.2. Расчет состава штейна.....	13
3. Теплотехнические расчеты .....	17
Литература .....	21

## Введение

Производства цветных и черных металлов связано с протеканием высокотемпературных, весьма энергоёмких процессов. Как развитие металлургии в целом, так и различных ее переделов всегда сопряжено с совершенствованием существующих или внедрением новых теплотехнических процессов.

В современном понимании печь - это тепловой агрегат, в котором происходит получение теплоты из того или иного вида энергии и передача ее материалу, подвергаемому обработке.

Подвергающее большинство процессов, протекающих в печах, совершается при высоких температурах и связано с большими затратами тепловой энергии. Высокая энергоёмкость печных процессов делает металлургическую теплотехнику ответственной за энергетические показатели работы печей, на долю которых приходится очень большая часть всей энергии. Тепломассообменные процессы, протекающие в рабочем пространстве печей, сложны и многообразны.

Большое разнообразие конструкций и режимов работы печей, применяемых на заводах цветной металлургии, обусловлено существованием огромного количества постоянно совершенствуемых технологий производства различных цветных металлов и сплавов. Основное назначение печи состоит в том, чтобы создать в ее рабочем пространстве наиболее благоприятные условия для реализации технологического процесса в результате использования тепла, которое принято называть рабочим видом энергии. Всех процессов, протекающих в печи, главным является технологический. Все остальные подчиняются ему и их развитие должно быть таким, чтобы технологический процесс проходил с наилучшими количественными и качественными показателями.

Создание новых и совершенствование существующих конструкций печей - сложная научно-техническая задача, решение которой связано с

изучением опыта работы агрегатов различного назначения в производственных условиях и детальным исследованием протекающих в их рабочем пространстве процессов тепло- и массопереноса.

В технических науках, в рамках которых изучают производство отдельных групп цветных и редких металлов, в качестве основных классификационных признаков печей обычно используют вид и основные характеристики реализуемых в них процессов, а также особенности конструкций отдельных агрегатов. В общей теории печей классификационными признаками служат режимы их тепловой работы.

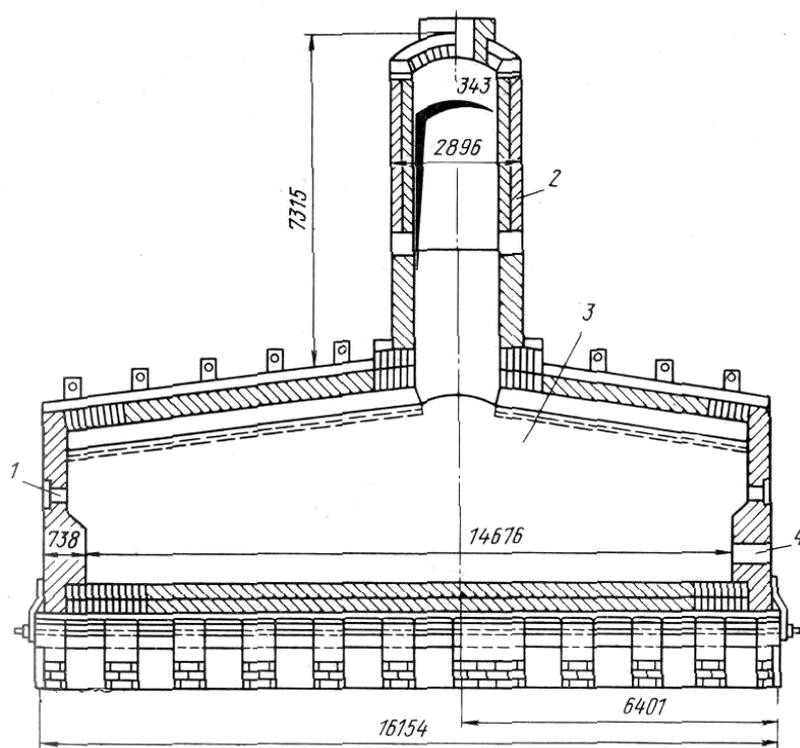
Печи могут быть отнесены к одному классу, если они имеют, по крайней мере, один общий отличительный признак. Его выбор зависит от характера систематизируемых данных. Например, когда основным объектом изучения служат процессы теплогенерации, печи делят на классы по виду источника тепла; при систематизации данных технологических исследований - по характеру протекающих в них технологических процессов; при анализе тепловой работы - по режимам их работы и т.д. Внутри класса различают типы и группы печей с двумя, тремя и большим числом отличительных признаков.

Тепловыделение в печах представляет собой процесс превращения какого-либо вида энергии в тепловую энергию. Источниками получения тепла являются: а) химическая энергия топлива (топливные печи); б) химическая энергия жидкого металла или шихты; в) электрическая энергия.

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1.1. ПЕЧИ ДЛЯ КИСЛОРОДНО-ФАКЕЛЬНОЙ ПЛАВКИ СУЛЬФИДОВ НА ШТЕЙН

В мировой практике медеплавильного производства известны пока два агрегата для взвешенной плавки и окисления сульфидов в горизонтальном технологическом факеле: один — на заводе канадской фирмы «Коппер-Клиф», другой — на Алмалыкском горно-металлургическом комбинате (АГМК). Печь кислородно-факельной плавки (КФП) конструктивно выполнена в виде прямоугольной камеры, в центре которой над сводом размещен вертикальный газоход. В ней предвари-



тельно высушенную шихту частично окисляют в токе кислорода с целью получения богатого по меди штейна и технологических газов с высоким содержанием сернистого ангидрида, направляемых на производство серной кислоты. Рабочее пространство печи имеет полезный объем  $720 \text{ м}^3$ , в котором  $600 \text{ м}^3$  занимает реакционное пространство и  $120 \text{ м}^3$  — ванна

расплавленного материала. Внутренняя длина печи 20 м, ширина 6 м, глубина ванны 1,0—1,5 м, высота рабочего пространства 4,0—4,5 м.

Фундамент печи представляет собой монолитную бетонную, подушку с расположенными на ней железобетонными опорами прямоугольного сечения, на которые сверху уложены чугунные плиты толщиной 25—50 мм. Между опорами циркулирует воздух, благодаря естественной конвекции охлаждающий поверхность бетона и металлических плит, которые служат основанием для пода печи. Под сооружают из жаропрочного бетона и трех слоев огнеупорного кирпича, выложенных в виде обратной арки. Верхние рабочие слои выкладывают из магнезитохромитового кирпича, нижний — из шамота. Зазоры между слоями заполняют порошком из огнеупорного материала.

Торцевые и боковые стены печи, толщина которых равна, соответственно, 920 и 810 мм, возводят из магнезитохромитового кирпича. Снаружи их забирают в стальной кожух. На уровне шлакового пояса и реакционного пространства для повышения стойкости кладки в ней размещают водоохлаждаемые медные кессоны. Для удаления шлака в задней торцевой стенке агрегата на расстоянии 0,7 м от поверхности пода установлены медные водоохлаждаемые кессоны с выпускной леткой. Штейн выпускают через сифон или шпуровые отверстия, расположенные в боковой стенке печи.

Распорно-подвесной свод из магнезитохромитового кирпича опирается на литые стальные подпятовые балки. Его внутренняя поверхность постоянно испытывает очень сильное воздействие агрессивной газовой среды со взвешенными в ней горящими частицами. Поэтому для защиты свода его охлаждают, используя для этого медные, омываемые химически очищенной водой, закладные кессоны или элементы системы испарительного охлаждения. В центре свода, примерно на расстоянии 12 м от передней торцевой стенки агрегата, размещен вертикальный газоход (аптейк), основными конструктивными элементами которого служат

промежуточные стенки, боковые стены и распорно-подвесной свод. Его нижняя часть, состоящая из промежуточных стен, опирается на два Г-образных водоохлаждаемых кессона, вверху он плавно переходит в горизонтальный газопровод, по которому технологические газы поступают в котел-утилизатор.

Снаружи печь КФП заключена в подвижный металлический каркас стоечного типа. Стойки выполняют из спаренных двутавров и крепят тягами, расположенными над сводом и под лещадью агрегата.

Печь отапливают с помощью двух шихтово-кислородных инжекционных, прямооточных горелок, установленных в специальных окнах, расположенных в передней торцевой стенке агрегата симметрично относительно его продольной осевой плоскости, на расстоянии 2 м одна от другой. Их оси сведены в находящуюся в районе газопровода точку на поверхности ванны. Через горелки производительностью по 30—40 т шихты в час с начальной скоростью около 20 м/с в печь подают газошихтовую смесь, движение которой приводит к формированию в ее стесненном стенками рабочем пространстве неравномерного поля скоростей с ярко выраженными проточной и циркуляционными зонами. Его образуют две узкие шихтово-кислородные струи, имеющие угол раскрытия порядка 26 град. На расстоянии 5,5 м от передней стенки реакционной камеры они сливаются в единый поток, представляющий собой мощный технологический факел с углом раскрытия около 30 град, ось которого находится в плоскости продольного осевого сечения печи. Объем, занимаемый проточной зоной в пространстве печи над ванной, невелик, но в нем сосредоточена основная масса материала, участвующего в теплогеперационных процессах. Такая организация движения материала дает возможность снизить вероятность разрушающего воздействия горящих сульфидных частиц на внутреннюю поверхность футеровки свода

печи, способствует снижению пылевыноса и приводит к сокращению времени пребывания материала в газовой фазе.

## **1.2. Теплогенерация и теплообмен в реакционной зоне печи**

В момент выхода из горелки смесь кислорода с шихтой вступает в тепловое взаимодействие с окружающими проточную часть факела замкнутыми и незамкнутыми циркуляционными зонами. Она также получает тепло, участвуя в лучистом теплообмене с поверхностями футеровки и ванны. Тепло, поступающее в зону технологического процесса, идет на нагрев шихтовых материалов и окислителя, которые по мере достижения нижней границы температур воспламенения сульфидов, находящейся примерно на уровне  $360^{\circ}\text{C}$ , вступают во взаимодействие, которое сопровождается сильным выделением тепла. Окисление шихты включает в себя два взаимосвязанных этапа: на первом происходит сжигание образующихся при разложении минералов паров элементарной серы, на втором — преимущественное окисление сульфидных частиц. Разложение сложных сульфидных соединений (минералов) происходит от  $360$  до примерно  $800^{\circ}\text{C}$ . Скорость окисления твердых сульфидов зависит от их температуры и концентрации кислорода в газовой фазе. Известно, однако, что до  $930^{\circ}\text{C}$  реакция идет крайне медленно, но затем после расплавления частиц скорость их окисления скачком увеличивается на порядок и далее растет прямо пропорционально подъему их температуры. Очевидно, что в этих условиях тепловыделение в факеле будет существенно зависеть от температуры движущихся в потоке окислителя частиц сульфидных материалов.

Способов прямого измерения в производственных условиях температуры различных компонентов технологического факела пока нет. Поэтому для оценки характера протекания процесса окисления шихты используют расчетные методы. Они основаны на частных решениях

уравнений теплового баланса зоны теплогенерации и переноса тепла в движущейся гетерогенной среде при различных упрощающих допущениях.

Наиболее широко применяют предположение о возможном равенстве температур газа и взвешенных в нем частиц, являющемся результатом интенсивного теплообмена между ними. Такое допущение дает возможность использовать понятие среднемассовой температуры потока, о величине которой можно судить по значению калориметрической температуры горения сульфидов. С помощью балансных расчетов нетрудно показать, что для шихты АГМК, содержащей 17% меди и 29% серы, при окислении элементарной серы калориметрическая температура не будет превышать  $900 - 910^\circ \text{C}$ . Следовательно, пока не выгорят пары элементарной серы, нельзя ожидать бурного окисления основной массы сульфидов, наступающего после их оплавления, т. е. при температурах выше  $930^\circ \text{C}$ .

В непрерывно работающей печи с относительно неизменными параметрами температурного режима работы этапы интенсивного тепловыделения в движущейся гетерогенной среде, если они разделены во времени, должны проявляться в виде четко ограниченных в пространстве высокотемпературных зон. Их расположение в печи и размеры зависят от соотношения скоростей нагрева и движения частиц, а также от составов шихты и продуктов плавки

Для экспериментального определения характеристик температурного и теплового режимов работы печей применяют разовые и термопары и специальные радиометры. Измеряемую с помощью термопары температуру  $t_T$  и рассчитанную по величине плотности потока эффективного излучения факела радиационную

температуру  $t_p$  нельзя отождествлять с реальной температурой какого-либо из его

компонентов. Они ( $t_T$  и  $t_p$ ) представляют собой сложные функции, зависящие от температур газа, взвешенных в нем частиц, параметров теплогенерационных процессов, а также интенсивности теплообмена между

средой и поверхностью датчиков. Тем не менее, измерение  $t_T$  и  $t_P$  — это единственный пока способ экспериментальной оценки расположения в печи высокотемпературных зон интенсивного окисления сульфидов.

В печи КФП под сводом в результате содом действия системы охлаждения футеровки. Температура  $t_T$  на 200-250<sup>0</sup>С ниже средней температуре продуктов плавки, а вблизи ванны — на 150-250<sup>0</sup>С выше. Существует значительная разница между температурами  $t_T$  и  $t_P$  в зоне окисления паров элементарной серы, а температура  $t_T$  на выходе из нее падает. Таким образом, хотя избыточное тепло выводится из печи, в ее реакционном пространстве сохраняется неравномерное распределение температур и перегрев продуктов окисления сульфидов.

Основные особенности (достоинство и недостатки) тепловой работы агрегатов для кислородно-факельной плавки на штейн обусловлены тем, что окисление сульфидов в токе кислорода дает возможность свести к минимуму относительный (приходящийся на единицу массы проплавляемой шихты) объем отходящих из печи газов. Его сокращение сопровождается значительным повышением топливного эквивалента шихты, позволяющим вести плавку в автогенном режиме, и уменьшением энергозатрат на очистку технологических газов от пыли при полной утилизации содержащейся в них серы. Кроме того, применение кислородного дутья способствует ускоренному протеканию экзотермических реакций и, соответственно, сокращению зоны теплогенерации и связанному с ним уменьшению габаритов печи. Однако наряду с энерго и ресурсосбережением для кислородно-факельной плавки характерно ухудшение (по сравнению с отражательной и шахтной плавками) условия протекания основных технологических процессов — расплавления шихты и разделения полученных продуктов на шлак и штейн.

## 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

### ПРОЦЕССА КИСЛОРОДНО-ФАКЕЛЬНОЙ ПЛАВКИ

#### МЕДНОГО КОНЦЕНТРАТА

#### 2.1. Расчет состава шихты

Особенности КФП является то, что он протекает со значительным избытком тепла от реакций окисления сульфидов и шлакообразования, в связи с чем в шихту для плавки добавляется кварцевая руда.

В результате многолетних исследований и испытаний, проведённых непосредственно на печи КФП медного завода АГМК, было получено оптимальное соотношение медного концентрата и кварцевой руды при составлении шихты: медный концентрат – 84 %, кварцевая руда – 16 %. При этом достигается, минимальная вязкость и температура плавления шлаковой фазы, что обеспечивает минимальные потери меди со шлаком.

Медь в виде  $\text{CuFeS}_2$  составляет 7,2 % в концентрате.

Расчет ведем на 94 % концентрат и 16 % кварц.

$$\text{Cu } 7,2 - 100$$

$$X - 84$$

$$X = \frac{7,2 \times 84}{100} = 6,1 \text{ Cu в виде } \text{CuFeS}_2$$

$$\text{Fe } 6,4 - 100$$

$$X - 84$$

$$X = \frac{6,4 \times 84}{100} = 5,4 \text{ Fe в виде } \text{CuFeS}_2$$

$$\text{S } 7,2 - 100$$

$$X - 84$$

$$X = \frac{7,2 \times 84}{100} = 6,1 \text{ S в виде } \text{CuFeS}_2$$

Проверка:  $6,1 + 5,4 + 6,1 = 17,6 \text{ CuFeS}_2$  в шихте.

Расчет состава продуктов КФП

Количество меди в штейне из 100 кг сухой шихты.

$$15,3 \times 0,98 = 15_{\text{кг}}$$

где - 0,98 извлечение меди в штейн при плавке.

Количество штейна на 100кг шихты:

$$15,0 \frac{100}{40} = 37,3 \text{ кг}$$

где - 40 оптимальное содержание меди в штейне КФП по заводским данным, %.

Теоретический в штейне содержащий 40 % меди, присутствует 20,4 % серы. Отсюда находим содержание серы в штейне:

$$37,3 \times 0,204 = 7,6 \text{ кг}$$

Удаляется серы в процессы плавки (без учёта её перехода в шлак).

$$25,9 - 7,6 = 18,3 \text{ кг}$$

Таблица 1

Результаты расчета состав шихты, %

Соединения	Cu	Fe	S	Zn	Pb	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	проч.	итого
CuFeS <sub>2</sub>	6,1	5,4	6,1										17,6
Cu <sub>2</sub> S	9,2		2,2										11,4
FeS <sub>2</sub>		15,3	17,4										32,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		1,0								0,4			1,4
2FeO × Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2,8							2,5	0,8			6,1
SiO <sub>2</sub>							22,5						22,5
ZnS			0,1	0,4									0,5
PbS			0,1		0,1								0,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>									2,7				2,7
CaCO <sub>3</sub>						1,1					0,9		2,0
MgCO <sub>3</sub>								1,3			1,4		2,7
Прочие												0,2	0,2
Итого	15,3	24,5	25,9	0,4	0,1	1,1	22,5	1,3	5,2	1,2	2,3	0,2	100,0

Степень десульфуризации при плавке:

$$\frac{18,3}{25,9} \cdot 100 = 70,7\% .$$

По данным заводского химического и рационального анализа штейн КФП содержит следующие химические соединения:  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{FeS}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $2\text{FeO} \times \text{SiO}_2$ .

## 2.2. Расчет состава штейна

Количество  $\text{Cu}_2\text{S}$  в штейне:

$$15 \cdot \frac{159,2}{127,2} = 18,7_{\text{кг}} \text{ Cu}_2\text{S} \text{ в штейне.}$$

Количество серы в штейне:

$$18,7 - 15 = 3,7 \text{ кг S в Cu}_2\text{S}$$

если:

$$\begin{array}{r} 37,3 \text{ — } 100\% \\ 18,7 \text{ — } X \\ X = 50,1\% \text{ Cu}_2\text{S} \end{array}$$

Количество кислорода в штейне:

$$\text{Кислород в штейне } 37,3 \times 0,02 = 1,1.$$

Кислород в штейне содержится в форме  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

Количество  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  в штейне:

$$1,1 \frac{230}{64} = 3,9_{\text{кг}}. \text{ из них } 1,1 \text{—O}_2, 2,8 \text{—Fe} .$$

прочие 0,3% или 0,1 кг.

Количество  $\text{FeS}$  в штейне

$$37,3 - (18,7 + 3,9 + 0,1) = 14,6 \text{ кг FeS}$$

$$\text{FeS } 77,8 \text{ — } 32 \text{ S}$$

$$14,6 \text{ — } X$$

$$X = 6 \text{ кг S}_2 \quad 14,6 - 6 = 8,6 \text{ кг Fe.}$$

$$8,6 + 2,8 = 11,4 \text{ кг Fe в штейне или } 31,8\%.$$

Как уже отмечалось, в процессе КФП получается относительно богатый по содержанию меди шлак. Он имеет следующий химический состав, %:  $\text{Cu}$  - 0,9;  $\text{Fe}$  - 41,8;  $\text{S}$  - 0,6;  $\text{Zn}$  - 0,2;  $\text{CaO}$  - 1,5;  $\text{SiO}_2$  - 34,1;  $\text{MgO}$  - 1,4;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - 6,7; прочие - 12,8.

*Итого — 100,0*

По данным рационального состава анализа шлак КФП содержит следующие химические соединения:  $\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $2\text{ZnO} \times \text{SiO}_2$ ,  $\text{FeS}$ ,  $2\text{FeO} \times \text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO} \times \text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO} \times \text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ .

Таблица 2

**Рациональный состав штейна КФП, %**

Соединения	Cu	Fe	S	Zn	SiO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Проч.	Итого
Cu <sub>2</sub> S	40,0		10,1					50,1
FeS		26,2	15,1					41,3
ZnS			0,1	0,2		2,1		0,3
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>		5,5				0,1		7,6
2Fe×SiO <sub>2</sub>		0,2			0,1			0,4
прочие							0,3	0,3
Итого	40,0	31,8	25,3	0,2	0,1	2,2	0,3	100,0

Результаты расчета рационального состава шлака даны в табл. 3.

Таблица 3

**Рациональный состав шлака КФП, %**

Соединения	Cu	Fe	S	Zn	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	прочие	итого
Cu <sub>2</sub> S	0,9		0,2								1,1
2ZnO×SiO <sub>2</sub>			0,1	0,2		0,1					0,4
FeS		0,8	0,3								1,1
2FeO×SiO <sub>2</sub>		28,0				14,9			8,0		50,9
FeO×Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		4,9						8,9	1,4		15,2
CaO×SiO <sub>2</sub>					1,0	1,0					2,0
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>		8,1							3,1		11,2
MgO×SiO <sub>2</sub>						2,1	1,4				3,5
CaO×Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					0,5			0,9			1,4
SiO <sub>2</sub>						12,9					12,9
Прочие										0,3	0,3
Итого	0,9	41,8	0,6	0,2	1,5	31,0	1,4	9,8	12,5	0,3	100,0

Одним из продуктов КФП является запылённые (до 40-60 г/м<sup>3</sup> твердого) газы.

Анализ пыли печи КФП показал что она имеет следующий химический состав, %: Cu—25,4; Fe—32,8; S—14,2; Zn—0,2; CaO—1,2; SiO<sub>2</sub>—14,9; MgO—1,3; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—2,0; прочие—8,0.

*Итого—100,0*

По данным рационального анализа пыль содержит следующие соединения Cu<sub>2</sub>S, ZnO, FeS, 2FeO×SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO×SiO<sub>2</sub>, FeO×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO×SiO<sub>2</sub>, CaO×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>.

Результаты расчета даны в табл. 4.

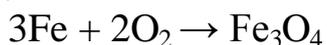
Для составления окончательного материального баланса КФП необходимо произвести некоторые дополнительные технологические расчеты.

В шлаке содержится железа в виде магнетита:

$$44,4 \times 0,081 = 3,6 \text{ кг}$$

где 44,4—количество шлака на 100 кг шихты, кг.

Количество кислорода необходимое для окисления железа по реакции:



$$\frac{64}{168} \cdot 3,6 = 1,4 \text{ кг}$$

В шлаке содержится железа в виде вюстита:

$$44,4 \times 0,32 = 14,6 \text{ кг.}$$

С шихтой поступает железа в виде вюстита 2,8 кг.

Таблица 4

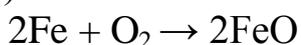
Рациональный состав пыли, %

Соединения	Cu	Fe	S	Zn	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	Проч.	Итого
Cu <sub>2</sub> S	25,4		6,4								31,8
2FeO×SiO <sub>2</sub>				0,2		0,1			0,1		0,4
FeS		13,6	7,8								21,4
2FeO×SiO <sub>2</sub>		4,1				2,2			1,2		7,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		14,4							6,2		20,6
CaO×SiO <sub>2</sub>					0,8	0,9					1,7
FeO×Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0,7						1,3	0,2		2,2
CaO×Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					0,4			0,7			1,1
MgO×SiO <sub>2</sub>						2,0	1,3				3,3
SiO <sub>2</sub>						9,7					9,7
Прочие										0,3	0,3
Итого	25,4	32,8	14,2	0,2	1,2	14,9	1,3	2,0	7,7	0,3	100,0

Окисляется железа до вюстита:

$$14,6 - 2,8 = 11,8 \text{ кг.}$$

Количество кислорода для окисления железа по реакции (расчет по Fe):

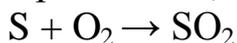


$$\frac{32}{112} \cdot 11,8 = 3,4 \text{ кг}$$

Всего на окисления железа теоретически необходимо кислород:

$$1,4 + 3,4 = 4,8 \text{ кг.}$$

Принимаем, что вся сера окисляется по реакции:



Выше найдена степенны десульфуризацим при плавке равная 70,7%. Количество серы окисляется по реакции равно:

$$25,9 \cdot 0,707 = 17,4 \text{ кг}$$

Потребное количество кислорода для окисления серы по реакции (3)

$$\frac{32}{32} \cdot 17,4 = 17,4 \text{ кг}$$

Переходит в штейн и шлак кислорода

$$(2,2 \cdot 0,44 + 12,5 \cdot 0,36) - 1,2 = 4,2 \text{ кг.}$$

где—0,44 и 0,36-выход шлака и штейна на 100кг шихты соответственно.

Общая потребность кислорода:

$$4,2 \cdot 4,8 + 17,4 = 26,4 \text{ кг.}$$

Полученный данный расход кислорода на 100кг шихты хорошо согласуется с данными литературе. Установка производительности 400<sup>т</sup>/сут кислорода обслуживает печь производительности 1500т сухой шихты в сутки.

При расчете газов КФП определяются следующие величины:

Количество серы переходящей в газы (17,4). Количество образующуюся при этом сернистого ангидрида (34,8). Объем сернистого ангидрида:

$$\frac{34,8}{64} \cdot 22,4 = 12,2 \text{ м}^3.$$

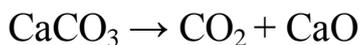
По данным практики объемный процент сернистого ангидрида в газах КФП составляет 75%. Общий объем отходящих газов:

$$\frac{12,2}{0,75} = 16,3 \text{ м}^3.$$

В тем числе.

а) пары воды: 0,5 кг или  $0,5 / 22,4 = 0,6 \text{ м}^3$ .

б) диоксид углерода получаемый при реакции разложения карбоната кальция:



Составляет 0,9кг или  $\frac{0,9}{44} \cdot 22,4 = 0,5 \text{ м}^3$ .

в) диоксид углерода от разложения карбоната магния по реакции:



Составляет 1,4кг или  $\frac{1,4}{44} \cdot 22,4 = 0,7 \text{ м}^3$ .

Остальной объем следует условно отнести на азот, которого в газах будет (на 100кг сухой шихты).

$$16,3 - 12,2 - 0,6 - 0,7 - 0,5 = 2,3 \text{ м}^3 \text{ или } \frac{2,3}{22,4} \cdot 28 = 2,9 \text{ кг.}$$

Результаты расчета количество и состава технологических газов даны в табл. 5

Таблица 5

Количество и состав газов КФП.			
Газы	Масса, кг	Объем, м <sup>3</sup>	Процентное содержание, %
SO <sub>2</sub>	34,8	12,2	74,8
N <sub>2</sub>	2,9	2,3	14,1
H <sub>2</sub> O	0,5	0,6	3,7
CO <sub>2</sub>	2,3	1,2	7,4
O <sub>2</sub>	1,0	0,5	1,0
ИТОГО	40,5	16,4	100,0

### 3. Теплотехнические расчеты

Приход тепла в процессе КФП складывается из следующих статей:  
физическое тепло шихты

$$Q_{ш} = G_{ш} \cdot C_{ш} \cdot T_{ш}.$$

где,  $G_{ш}$ —масса шихты, кг ;

$C_{ш}$ —ср. удельная теплоёмкость шихты, кДж/(кг×К);

$T_{ш}$ —температура шихты, К;

Для расчета средней удельной теплоёмкости шихты ограничимся следующими основными её компонентами: Cu<sub>2</sub>S, FeS<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, CuFeS<sub>2</sub>, 2FeO×Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

$$C_{ш} = \frac{\sum m_i \cdot c_i}{\sum m_i}.$$

где,  $m_i$ —масса  $i$ -ого компонента, кг;

$c_i$ —удельная теплоёмкость  $i$ -ого компонента при 293К, кДж/(кг×К)

Подставив в формулу (4-7) массу компонентов шихты из табл. 4.8 и их средние удельные теплоёмкости по справочнику получим:

$$C_{ш} = \frac{11,4 \cdot 0,67 + 32,7 \cdot 0,79 + 22,5 \cdot 0,91 + 17,6 \cdot 0,75 + 6,1 \cdot 0,81}{11,4 + 32,7 + 22,5 + 17,6 + 6,1} = 0,798 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Отсюда по формуле:

$$Q_{ш} = 100 \cdot 0,798 \cdot 293 = 23381 \text{кДж}.$$

Физическое тепло технического кислорода:

$$Q_{O_2} = G_{O_2} \cdot C_{O_2} \cdot T_{O_2}.$$

где,  $G_{O_2}$  -масса технического кислорода, кг;

$C_{O_2}$  -удельная теплоёмкость технического кислорода при 293 К;

$T_{O_2}$  -температура технического кислорода, К.

Содержание кислорода в техническом кислороде 95%. Принимаем, что остальные 5% приходятся на азот.

Тогда удельная теплоемкость технического кислорода:

$$C_{O_2} = \frac{C_{O_2}^4 \cdot m_{O_2}^4 \cdot C_{N_2} \cdot m_{N_2}}{m_{O_2}^4 \cdot m_{N_2}}$$

где,  $C_{O_2}^4$  – удельная теплоёмкость чистого кислорода при 293К, кДж/(кг×К);

$C_{N_2}$  – удельная теплоёмкость азота при 293К, кДж/(кг×К);

$m_{O_2}^4$  и  $m_{N_2}$  – масса чистого кислорода и азота, кг.

Отсюда по формуле (4-8):

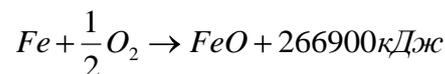
$$Q_{O_2} = 26,4 \cdot 1,47 \cdot 293 = 11370 \text{ кДж};$$

$$C_{O_2} = \frac{1,47 \cdot 26,7 + 1,4 \cdot 1,4}{26,4 \cdot 1,4} = 1,47 \text{ кДж}.$$

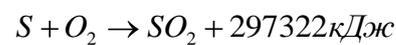
Тепло экзотермических реакции окисления железа и серы.



$$q_1 = \frac{1119000}{168} \cdot (37,3 \cdot 0,076 + 3,6) = 42860 \text{ кДж};$$



$$q_2 = \frac{266900}{56} \cdot (37,3 \cdot 0,0003 + 4,2 \cdot 0,062 + 14,6 - 3,6) = 54201 \text{ кДж};$$



$$q_3 = \frac{297322}{32} \cdot 17,4 = 161669 \text{ кДж}.$$

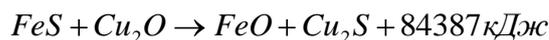
Всего тепло реакций окисления железа и серы:

$$Q_{\text{экс}} = q_1 + q_2 + q_3 = 42860 + 54201 + 161669 = 25870 \text{ кДж};$$

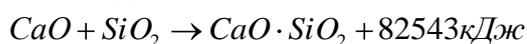
Тепло реакций шлакообразования



тепло прочих экзотермических реакций:



$$q_4 = \frac{84387}{160} \cdot 0,16 = 84 \text{ кДж}$$



$$q_5 = \frac{82543}{56} \cdot 1,1 = 1621 \text{ кДж};$$

Всего тепло прочих экзотермических реакций:

$$Q_{\text{проч}} = q_4 + q_5 = 84 + 1621 = 1705 \text{ кДж}$$

Всего проход тепла

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{ш}} + Q_{\text{O}_2} + Q_{\text{экз}} + Q_{\text{шлт}} + Q_{\text{проч}} = 23381 + 11974 + 258730 + 5253 + 1705 = 301043 \text{ кДж};$$

Расход тепло состоит из следующих частей:

1) тепло штейна

$$Q_{\text{шт}} = G_{\text{шт}} \cdot C_{\text{шт}} \cdot T_{\text{шт}}$$

где,  $G_{\text{шт}}$ —выход штейна на 100кг шихты, кг;

$C_{\text{шт}}$ —удельная теплоёмкость штейне КФП содержащего 40 % меди при 1473К, кДж/(кг×К);

$T_{\text{шт}}$ —температура штейна, К.

По данным Ю.П. Купрякова теплоёмкость штейна КФП при 1473 К составляет 0,838 кДж/(кгК).

Отсюда тепло штейна.

$$Q_{\text{шт}} = 373,3 \times 0,838 \times 1473 = 45417 \text{ кДж};$$

2) тепло шлака

$$Q_{\text{шл}} = G_{\text{шл}} \cdot C_{\text{шл}} \cdot T_{\text{шл}}$$

где,  $G_{\text{шл}}$ —масса шлака, кг;

$C_{\text{шл}}$ —удельная теплоёмкость шлака при 1483К, кДж/(кг×К);

$T_{\text{шл}}$ —температура шлака, К.

По Х.К. Аветисяну теплоёмкость шлака данного состава при 1483 К равна 1,24 кДж/(кг×К).

Тепло шлака по формуле

$$Q_{\text{шл}} = 44,4 \cdot 1,24 \cdot 1483 = 81103 \text{ кДж}.$$

3) физическое тепло пыли

$$Q_n = G_n \cdot C_n \cdot T_n$$

где,  $G_n$ —пылевынос на 100кг шихты, кг;

$C_n$ —средняя удельная теплоёмкость пыли КФП при 1573К, кДж/(кгК);

$T_n$ —температура пыли, К.

$$Q_n = 4,2 \cdot 0,84 \cdot 1573 = 5550 \text{ К}.$$

4) тепло газов.

$$Q_g = T_g \cdot \sum V_i \cdot C_i$$

где,  $T_g$ —температура газов, К;

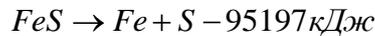
$V_i$ —объём  $i$ -ого компонента газов, м<sup>3</sup>;

$C_i$ —теплоёмкость  $i$ -ого компонента газов при 1573К, кДж/(м<sup>3</sup>К).

Учитывая данные находим:

$$Q_{\Gamma} = (V_{SO_2} \cdot C_{SO_2} + V_{N_2} \cdot C_{N_2} + V_{H_2O} \cdot C_{H_2O} + V_{CO_2} \cdot C_{CO_2}) \cdot T_{\Gamma} = (12,2 \cdot 2,24 + 2,3 \cdot 1,48 + 0,6 \cdot 172 + 1,2 \cdot 1,81) \cdot 1573 = 53381 \text{кДж};$$

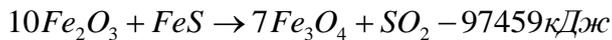
5) тепло эндотермических реакций



$$q_1 = \frac{95197}{56} \cdot 16,14 = 27437 \text{кДж}$$



$$q_2 = \frac{399558}{160} \cdot 1,4 = 3496 \text{кДж}$$



Всего тепло эндотермических реакций.

$$Q_{\text{энд}} = q_1 + q_2 + q_3 = 27437 + 3496 + 332 = 31265 \text{кДж};$$

$$q_3 = \frac{97459}{88} \cdot 0,3 = 332 \text{кДж}$$

б) тепло на испарение 0,5 кг влаги

$$Q_{H_2O} = 0,5 \cdot 2514 = 1257 \text{кДж}$$

где, 2514 - тепло, затрачиваемое на испарение 1кг воды, находящейся при температуре 293К, кДж/кг;

7) потери тепла с водой кессонов

$$Q_k = G_k \cdot C_k \cdot T_k$$

где,  $G_k$ —расход воды на 100кг сухой шихты, кг;

$C_k$ —теплоёмкость охлаждающей воды при 313К, кДж/(кгК);

$T_k$ —температура воды на выходе из кессонов, К;

$$Q_k = 178,7 \cdot 1,48 \cdot 3,13 = 82810 \text{кДж}$$

8) всего расход тепла.

$$Q_{\text{расч}} = Q_{\text{шт}} + Q_{\text{шл}} + Q_n + Q_{\Gamma} + Q_{\text{энд}} + Q_{H_2O} + Q_{\text{кес}} = 45417 + 81103 + 5550 + 53381 + 31265 + 1257 + 82810 = 300783 \text{кДж};$$

9) неучтённые потери и невязка баланса.

$$Q_{\text{неуч}} = Q_{\text{прих}} - Q_{\text{рас}} = 301043 - 300783 = 260 \text{кДж};$$

Результаты расчёта теплового баланса КФП даны в табл. 6.

Таблица 6

## Тепловой баланс КФП.

Статьи прихода тепла	кДж	%	Статьи прохода тепла	кДж	%
1. Тепла шихты	23381	7,9	1. Тепло штейна	45417	15,2
2. Тепло кислорода	11974	4,1	2. Тепло шлака	81103	26,9
3. Тепло экзотермических окисления Fe и S <sub>2</sub>	258730	85,6	3. Тепло пыли	5550	1,8
4. Тепла реакций шлакообразования	5253	1,8	4. Тепло газов	53381	17,8
5. Тепло прочих реакций	1705	0,6	5. Тепло эндотер- мических реакций	31265	10,5
			6. Тепло на испарение влаги	1257	0,4
			7. Потери с водой кессонов	82810	27,3
			8. Неучтённые потери	260	0,1
ИТОГО	301043	100,0	ИТОГО	301043	100,0

## Литература:

1. Кривандин В.А. Белоусов В.В. и др. «Теплотехника металлургического производства» Т.1,2. Конструкция и работа печей. М. МИСиС. 2002 г.
2. Диомидовский Д.А. «Металлургические печи» Москва, «Металлургиздат», 1970 г.
3. Матрюков Е.С. «Теплотехнические расчеты промышленных печей» «Металлургия» 1972г.
4. Кобахидзе В.В. «Тепловая работа и конструкции печей цветной металлургии» Москва, МИСиС. 1994г.
5. Лоскутов Ф.М., Цейдлер А.А. «Расчеты по металлургии тяжелых цветных металлов» - Москва, 1963.