«Электроплавка»

**Гальнбек А.А., Голубев В.О.**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА СЫРЬЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ПЛАВИЛЬНОГО ЦЕХА ГМК «ПЕЧЕНГАНИКЕЛЬ»

**2003**

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ ..... 3

Глава 1. ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ В ПЛАВЦЕХЕ ГМК «ПЕЧЕНГАНИКЕЛЬ» ..... 4

1.1. Распределение цветных металлов между продуктами плавки ..... 5

1.2. Разработка модели электроплавки и сквозной модели плавцеха ..... 15

1.3. Разработка модели энергетики электроплавки брикетированного концентрата ..... 30

Глава 2. ИЗМЕНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛАВЦЕХА ГМК «ПЕЧЕНГАНИКЕЛЬ» ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА НОВЫЙ ВИД СЫРЬЯ ..... 32

2.1. Изменение технологических показателей плавцеха при переходе на брикеты ..... 32

2.1.1. Состав исходного сырья ..... 32

2.1.2. Изменение основных технологических показателей ..... 37

2.2. Влияние изменения состава брикетов на технологические показатели плавцеха ..... 41

2.2.1. Состав исходного сырья ..... 41

2.2.2. Изменение основных технологических показателей ..... 42

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ..... 48

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК ..... 50

ПРИЛОЖЕНИЯ ..... 51

© 2012, Math Designer

## ВВЕДЕНИЕ

Планируемое радикальное изменение состава сырья, направляемого в металлургическое производство в плавильный цех комбината «Печенганикель», - переход на переработку брикетированного концентрата - неизбежно внесет весьма существенные изменения в технологию цеха.

Основным компонентом шихты рудно-термических печей плавильного цеха в настоящее время являются обожженные окатыши и рудное сырье близлежащих рудников, суммарная доля которых в общей массе загрузки электропечи по данным технических отчетов составляет 45-50 %. Переход на плавку брикетированного концентрата, химико-минералогический состав и физические характеристики которого резко отличаются от смеси руды и обожженных окатышей, повлечет неизбежное изменение технологии плавильного цеха. В первую очередь эти изменения затронут головной передел – рудную электроплавку, показатели которой зависят как от состава исходного сырья (собственная руда, окатыши, норильская руда, штейны и шлаки других комбинатов, скрап, зачистки лежалого сырья, а в скором времени и брикеты) так и оборотного (жидкий конвертерный шлак).

Большое разнообразие, широкий диапазон химико-минералогических составов и физических характеристик загружаемых компонентов в сочетании с постоянным изменением долей загружаемых компонентов (о чем свидетельствуют технические отчеты плавильного цеха за последние годы) затрудняют априорную оценку технологических показателей плавцеха и составов конечных и промежуточных продуктов. Практика показывает, что в таких условиях работа электропечей становится крайне нестабильной, что сопровождается снижением технико-экономических показателей, ухудшением экологической обстановки и условий труда, а в ряде случаев чревато возникновением нештатных и аварийных ситуаций.

© 2012, Math Designer

Переход на плавку брикетированного концентрата, скорее всего, повлечет за собой значительные трудности в ее освоении, поэтому проведение предварительных исследований направленных на разработку планируемой технологии, является весьма актуальным. Особое внимание должно быть уделено математическому моделированию электроплавки и конвертирования медно-никелевых руд и концентратов, что на существующем уровне развития электронной техники вполне осуществимо, несмотря на плохую моделируемость всех рудоплавильных процессов.

## Глава 1. ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПЕРЕРАБОТКИ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ В ПЛАВЦЕХЕ ГМК «ПЕЧЕНГАНИКЕЛЬ»

Физико-химические и энергетические особенности переработки брикетированного концентрата прежде всего сводятся к определению количества и состава продуктов плавки брикетов в РТП, их характеристик, показателей извлечения цветных металлов, удельного расхода электроэнергии на плавку.

Весь круг вопросов, касающихся химизма электроплавки, в конечном счете выражается в развернутом, поэлементном материальном балансе процесса, в котором должны быть представлены все исходные материалы и полученные продукты плавки. Без разработки и составления развернутого баланса, прослеживающего поведение всех основных металлов, включая железо, шлакообразующих, серы, газовых составляющих, невозможно аргументированно проанализировать влияние различных факторов на технологические показатели процесса. Поэтому разработка адекватной модели развернутого материального баланса, анализ полученных при решении этой модели зависимостей и выдача рекомендаций по осуществлению технологии плавки является одной из главных задач работы.

© 2012, Math Designer

### 1.1. Распределение цветных металлов между продуктами плавки

Опыт показывает, что наиболее неопределенными вопросами, возникающими при создании модели, является распределение цветных металлов между продуктами плавки [2]. Уровень развития металлургической науки в настоящее время таков, что не позволяет даже приблизительно теоретически осветить количественно эти вопросы, и здесь почти целиком приходится ориентироваться на заводскую практику. Этот путь позволяет разработать модель, со вполне удовлетворительной адекватностью отвечающую нуждам производства. Обязательным условием такого подхода является достаточная схожесть математической модели и процесса, для которого ведется численный расчет. Лишь в этом случае можно с уверенностью говорить об удовлетворительной точности расчета распределения цветных металлов в условиях моделируемого процесса.

В тех же случаях, когда модель и процесс имеют весьма рознящиеся характеристики, следует установить корреляционные зависимости между содержаниями цветных металлов и иных компонентов в продуктах плавки. Переход на плавку брикетов несомненно относится ко второму типу, поэтому прямой перенос данных нынешней технологии на новый процесс некорректен и может привести к заметным ошибкам. В этой связи, вопрос о количественном описании распределения цветных металлов между продуктами при плавке брикетов должен предшествовать разработке модели технологии, с тем, чтобы впоследствии это распределение было учтено при составлении модели.

Как известно, продуктами электроплавки сульфидных медно-никелевых концентратов являются обогащенный штейн, отвальный шлак, пыль и технологические газы. Поскольку пылеунос при рудной электроплавке медно-никелевой шихты целиком представлен чисто механическим уносом, вопрос распределения цветных металлов при плавке сводится к их распределению лишь между штейном и шлаком. При этом он может быть полностью описан через содержание цветных металлов в шлаке, так как наличие в структуре мо-

© 2012, Math Designer

дели зависимостей, определяющих это содержание, «автоматически» делает известным и содержание металлов в штейне.

Из теории и практики электроплавки медно-никелевого сульфидного сырья известно, что главными факторами, определяющими переход цветных металлов (никеля, кобальта и меди) в шлак являются содержания их в штейне, содержание кремнекислоты в шлаке, металлизация штейна, температура [1]. Действуя в совокупности, эти факторы обуславливают весьма сложную картину перехода цветных металлов в шлак. Она еще больше осложняется влиянием других факторов: содержания в шлаке других (помимо кремнекислоты) шлакообразующих, электрических параметров плавки, состояния ванны (высоты слоя шлака, заглубления электродов, системы загрузки печи шихтой, выпуска шлака и др.). Количественно описать всю эту совокупность невозможно не только теоретически, но и статистически, по заводским данным.

Однако и при использовании статистического подхода к описанию главных факторов возникают значительные трудности. Они определяются, прежде всего, недостаточностью заводских данных. Так, на комбинате металлизация заводских штейнов аналитически определяется крайне редко, в основном при проведении каких-либо специальных исследовательских работ. Замеры температуры шлаковой ванны печи почти никогда не производятся, ее периодически определяют только на выпуске шлака из печи. В сменных анализах шлака не определяется содержание меди, ее анализируют значительно реже [11].

Учитывая все эти моменты, в первую очередь ставилась задача выявления влияния наиболее значимых факторов на содержание цветных металлов в шлаке, определение наиболее важных соотношений, характеризующих это содержание, и построение соответствующих статистических зависимостей.

Следует особо подчеркнуть, что все используемые для анализа заводские данные никак не могли прямо относиться к плавке брикетированного концентрата, которой пока не существует. Вместе с тем, будущие брикеты по соотношениям содержаний металлов и шлакообразующих в общем отвечают

© 2012, Math Designer 

диапазону колебаний этих содержаний в нынешнем сырье (как будет видно из приведенных ниже данных, этот диапазон достаточно широк). Поэтому зависимости, полученные для нынешнего сырья, могут быть использованы и для модели плавки брикетов.

При выполнении этого этапа работы основное внимание было уделено анализу данных плавильного цеха за 2000 год. Для этого были взяты результаты заводских аналитических определений содержаний никеля, кобальта, кремнекислоты, оксида магния в шлаках и железа в штейнах в сменных пробах. Всего были обработаны данные примерно по 160 пробам, чего вполне достаточно для выявления значимых зависимостей.

На рис. 1.1-1.6 приведены данные по содержанию (концентрации) никеля и кобальта в указанных выше пробах в зависимости от содержания железа в штейне, кремнекислоты в шлаке и оксида магния в шлаке.

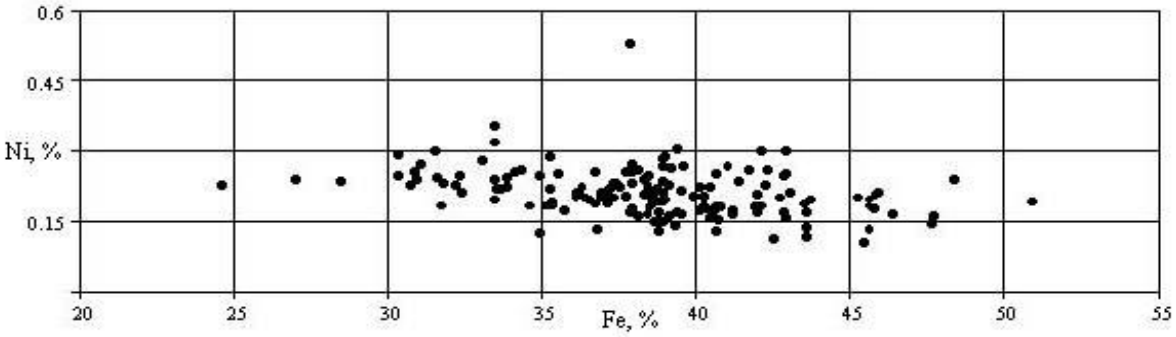



Рис. 1.1. Зависимость концентрации никеля в шлаке от концентрации железа в штейне.

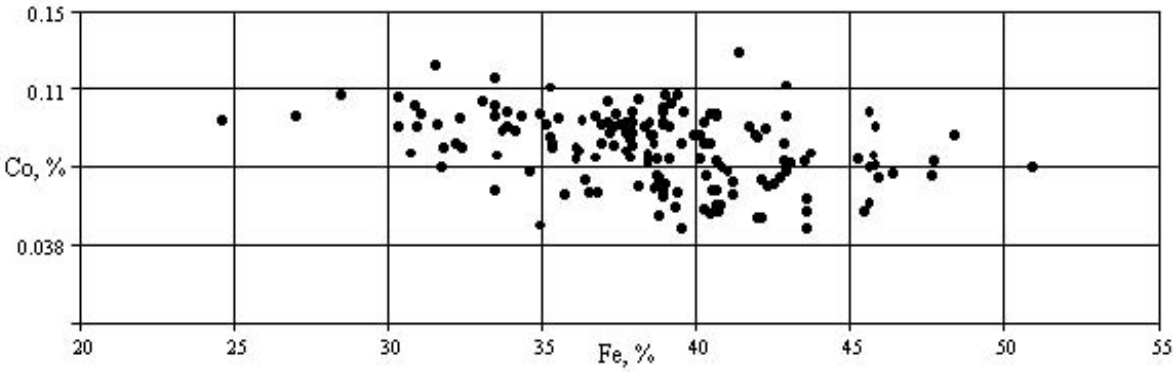



Рис. 1.2. Зависимость концентрации кобальта в шлаке от концентрации железа в штейне.

© 2012, Math Designer

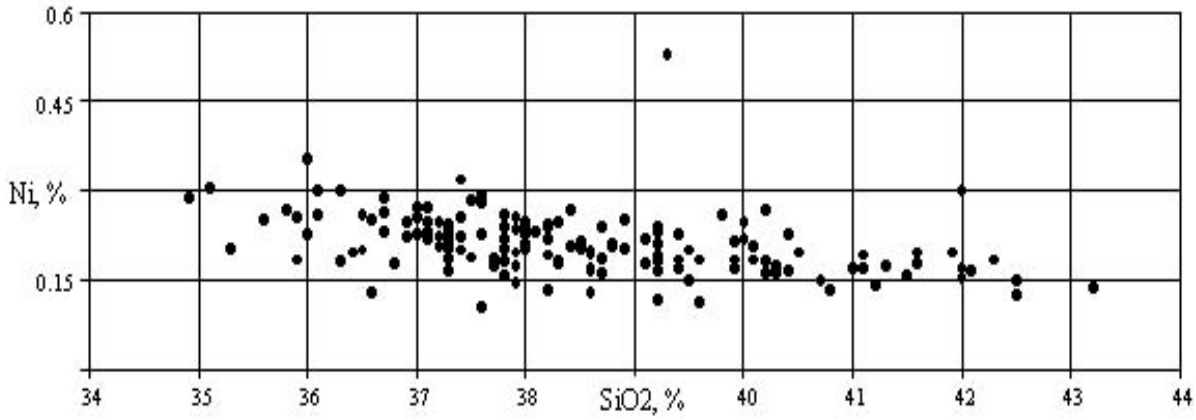



Рис. 1.3. Зависимость концентрации никеля в шлаке от концентрации кремнезема в шлаке.

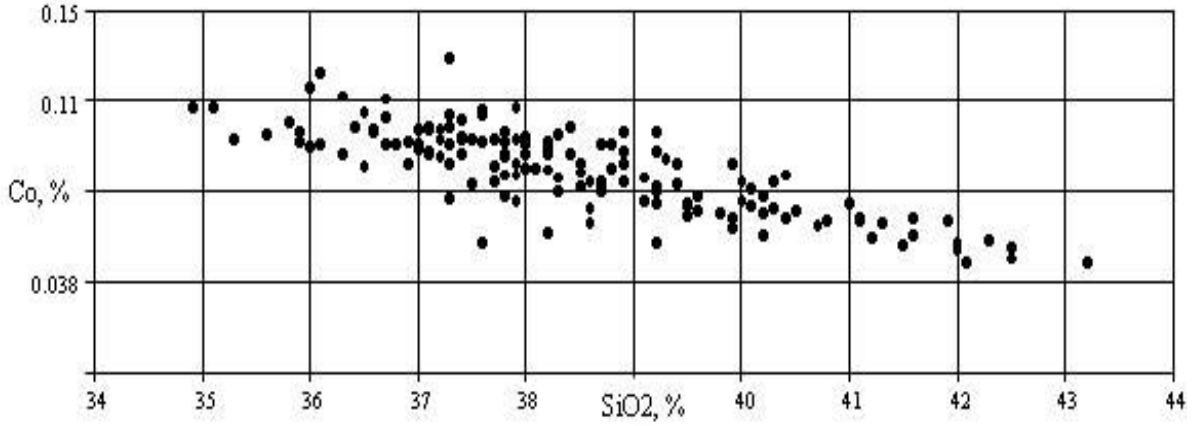



Рис. 1.4. Зависимость концентрации кобальта в шлаке от концентрации кремнезема в шлаке.

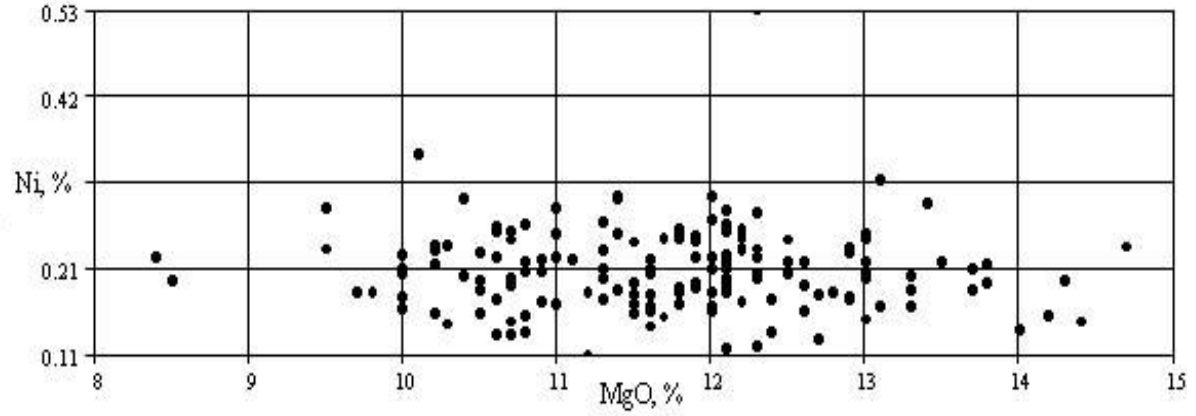



Рис. 1.5. Зависимость концентрации никеля в шлаке от концентрации оксида магния в шлаке

© 2012, Math Designer

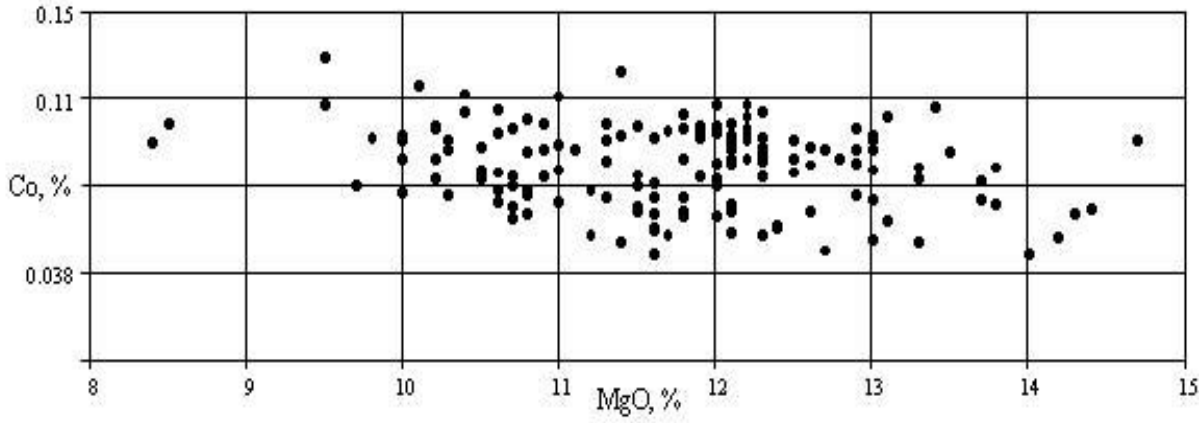



Рис. 1.6. Зависимость концентрации кобальта в шлаке от концентрации оксида магния в шлаке.

Впоследствии была произведена статистическая обработка, приведенных на рис. 1.1-1.6 с целью выявления зависимостей между содержаниями цветных металлов в шлаке и содержаниями иных компонентов.

Полученные данные относительно значимости парных коэффициентов корреляции показали, что между содержанием никеля и оксида магния в шлаке и содержанием железа в штейне и диоксида кремния в шлаке зависимость отсутствует (последнее, в общем, самоочевидно и определялось для контроля). Данные, полученные для коэффициентов корреляции между содержанием железа в штейне и оксидом магния в шлаке и содержанием диоксида кремния и оксида магния в шлаке, показывают, что все эти величины зависят от состава перерабатываемого сырья, а не друг от друга. Формально необходимо учитывать все значения полученных парных коэффициентов корреляции при оценке частных коэффициентов корреляции.

По результатам оценки коэффициентов частной корреляции для никеля сделаны следующие выводы. При постоянной концентрации железа в штейне и оксида магния в шлаке концентрация никеля в шлаке зависит от концентрации диоксида кремния в шлаке, коэффициент корреляции отрицательный (т.е. при увеличении концентрации $SiO_2$ в шлаке потери никеля уменьшаются, что согласуется с данными практики). При постоянной концентрации железа в

© 2012, Math Designer

штейне и диоксида кремния в шлаке концентрация никеля в шлаке не зависит от концентрации оксида магния в шлаке. При постоянной концентрации диоксида кремния в шлаке и оксида магния в шлаке концентрация никеля в шлаке зависит от концентрации железа в штейне, коэффициент корреляции отрицательный (т.е. при увеличении концентрации железа в штейне потери никеля уменьшаются, что согласуется с данными практики).

По результатам оценки коэффициентов частной корреляции для кобальта были сделаны следующие выводы. При постоянной концентрации железа в штейне и оксида магния в шлаке концентрация кобальта в шлаке зависит от концентрации диоксида кремния в шлаке, коэффициент корреляции отрицательный (т.е. при увеличении концентрации $SiO_2$ в шлаке потери кобальта уменьшаются, что согласуется с данными практики). При постоянной концентрации железа в штейне и диоксида кремния в шлаке концентрация кобальта в шлаке зависит от концентрации оксида магния в шлаке, коэффициент корреляции положительный (т.е. при увеличении концентрации MgO в шлаке потери кобальта увеличиваются). При постоянной концентрации диоксида кремния в шлаке и оксида магния в шлаке концентрация кобальта в шлаке зависит от концентрации железа в штейне, коэффициент корреляции отрицательный (т.е. при увеличении концентрации железа в штейне потери кобальта уменьшаются, что согласуется с данными практики).

По результатам анализа частных коэффициентов корреляции сделан вывод, что на потери никеля с отвальным шлаком наибольшее влияние оказывает концентрация $SiO_2$ в шлаке при неизменных концентрациях MgO в шлаке и Fe в штейне; на потери кобальта со шлаком большое влияние оказывает концентрация железа в штейне при неизменных концентрациях $SiO_2$ и MgO в шлаке.

По результатам оценки значимости частных коэффициентов корреляции сделан вывод, что значимыми факторами для оценки концентрации никеля в шлаке являются концентрации $SiO_2$ в шлаке и Fe в штейне, а для концентрации кобальта в шлаке - концентрации $SiO_2$ и MgO в шлаке и Fe в штейне.

© 2012, Math Designer 

Далее находили значения коэффициентов регрессии, входящих в выражения для определения потерь цветных металлов со шлаком. На основании проведенной обработки данных установлено, что для оценочных расчетов потерь цветных металлов (никеля и кобальта) с отвальным шлаком можно использовать регрессионные зависимости вида:

$$(Ni)^{шл} = 0{,}79 - 1{,}15 \cdot 10^{-3} \cdot (SiO_2)^{шл} - 3{,}54 \cdot 10^{-3} \cdot (Fe)^{шт} \qquad (1.1)$$

$$(Co)^{шл} = 0{,}446 - 7{,}69 \cdot 10^{-3} \cdot (SiO_2)^{шл} - 1{,}53 \cdot 10^{-3} \cdot (MgO)^{шл} - 1{,}23 \cdot 10^{-3} \cdot (Fe)^{шт} \qquad (1.2)$$

Приведенные результаты статистической обработки заводских данных характеризуют взаимосвязь содержаний никеля и кобальта в шлаках с основными определяющими их факторами за сравнительно короткий период работы электропечного передела - один календарный год. За этот период набор шихты РТП по основным шихтовым материалам изменялся незначительно - его основу составляли собственная «богатая» руда и обожженные окатыши.

Естественно, нет уверенности в том, что при переходе на новую шихту - брикетированный концентрат - полученные обработкой нынешних данных статистические характеристики полностью сохранят свои значения. Чтобы в какой-то мере ответить на этот вопрос, были обработаны данные, приведенные в отдельных технических отчетах за разные годы, начиная с 1953 года. Составы штейнов и шлаков, приводимые в отчетах, являются усредненными за отчетный месяц и получены в результате аналитических определений почти всего основного поэлементного состава этих продуктов. В отличие от сменных анализов, в этих определениях даются медь, сера, окисленное железо (в пересчете на FeO) и оксид кальция. Ограниченность материалов за прошлые годы существенно снижало возможности обработки.

Достаточно явная взаимосвязь содержаний никеля, меди и кобальта в шлаке прослеживается для содержания железа в штейне. О влиянии содержаний кремнезема и вюстита на концентрацию цветных металлов в шлаке можно говорить только предположительно, принимая во внимание недостаточность данных, отвечающих высоким содержаниям кремнезема в шлаках и соответ-

© 2012, Math Designer

ственно низким - вюстита. Вместе с тем, проверка показывает, что в целом рассматриваемые зависимости удовлетворительно коррелируют с вышеприведенными данными, полученными из сменных анализов 2000 года (рис. 1.7-1.14).

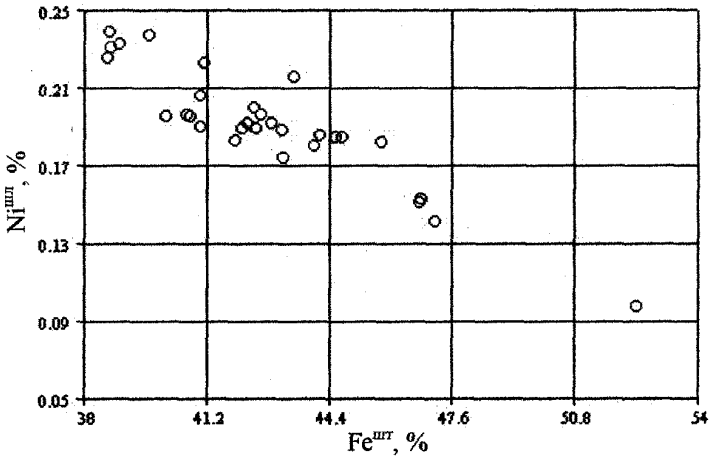



Рис. 1.7. Зависимость содержания никеля в шлаке от содержания железа в штейне.

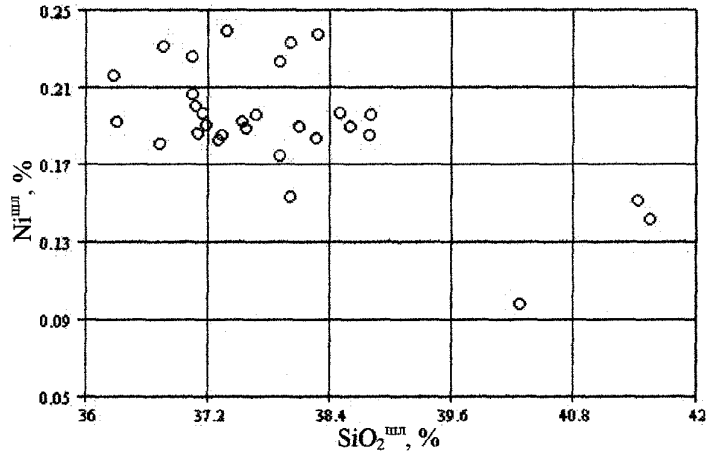
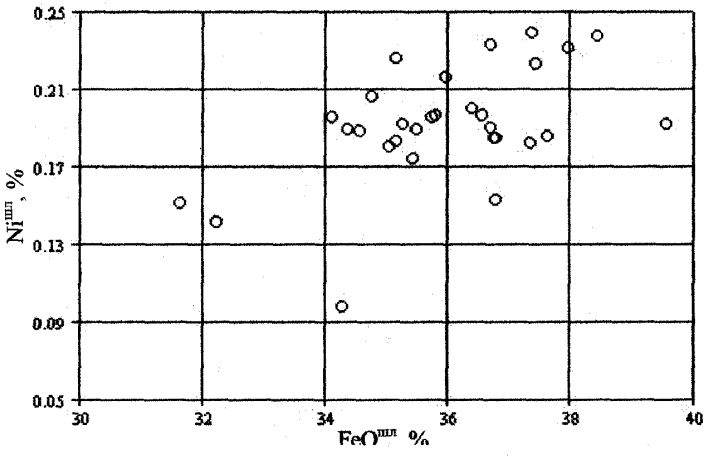



Рис. 1.8. Зависимость содержания никеля в шлаке от содержания кремнезема в шлаке.




© 2012, Math Designer 

Рис. 1.9. Зависимость содержания никеля в шлаке от содержания закиси железа в шлаке.

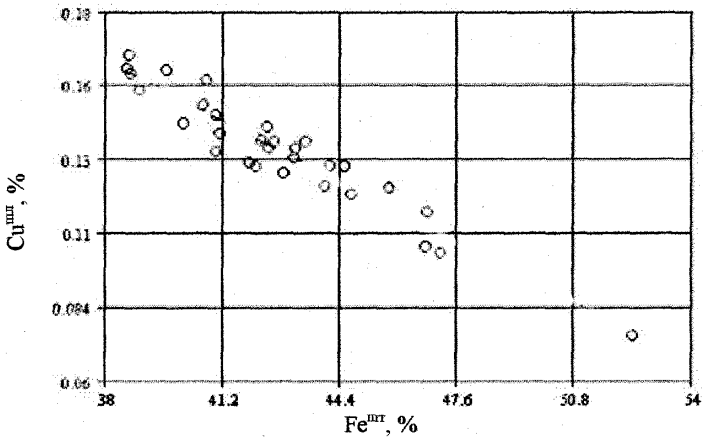



Рис. 1.10. Зависимость содержания меди в шлаке от содержания железа в штейне.

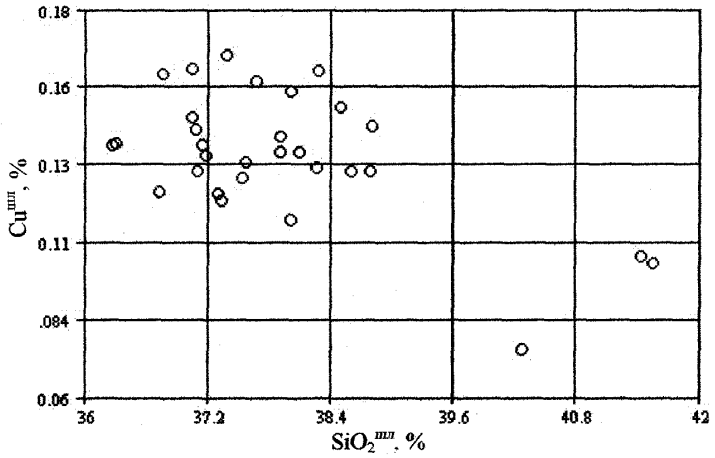
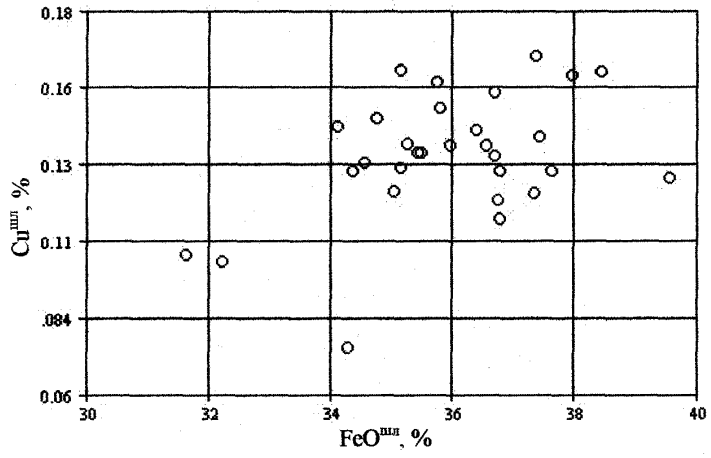



Рис. 1.11. Зависимость содержания меди в шлаке от содержания кремнезема в шлаке.




© 2012, Math Designer

Рис. 1.12. Зависимость содержания меди в шлаке от содержания закиси железа в шлаке.

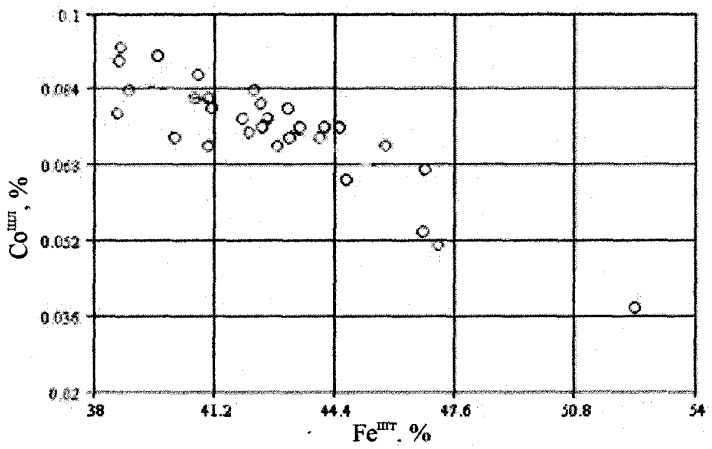



Рис. 1.13. Зависимость содержания кобальта в шлаке от содержания железа в штейне.

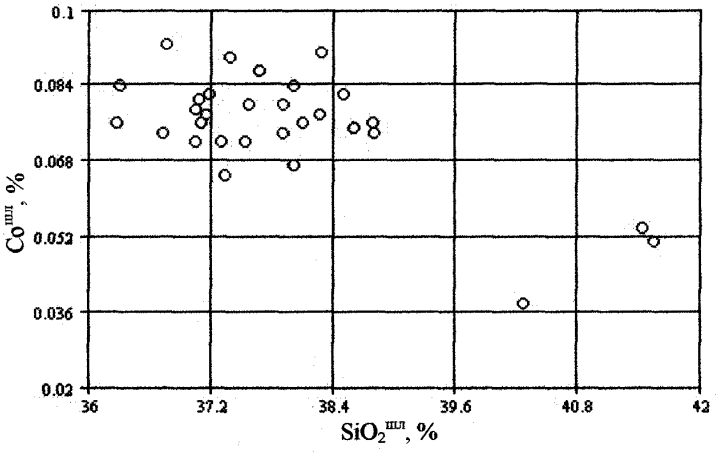



Рис. 1.14. Зависимость содержания кобальта в шлаке от содержания кремнезема в шлаке.

Поскольку выполненная выше статистическая обработка сменных анализов не содержала данных по концентрации меди в шлаках, из материалов технических отчетов была построена регрессионная зависимость этого содержания от железа в штейне, без учета влияния на медь кислотности шлака. Указанное уравнение имеет вид:

$$Cu^{шл} = 0{,}3981 - 6{,}153 \cdot 10^{-3} \cdot (Fe)^{шт} \qquad (1.3)$$

Можно полагать, что в диапазоне значений $(Fe)^{шт}$ 38 – 50 % эта зависимость имеет для меди определяющее значение.

© 2012, Math Designer

Представленные данные показывают, что усредненные составы продуктов плавки, приведенные в технических отчетах, могут служить исходным материалом для определенных выводов. Они прежде всего состоят в том, что во всех случаях, независимо от состава шихты и других условий плавок, одним из главных факторов, определяющих потери всех трех цветных металлов в шлаке, является общее содержание железа в штейнах и лишь на этом основании можно примерно прогнозировать содержание цветных металлов в шлаке.

### 1.2. Разработка модели электроплавки и сквозной модели плавцеха

Принципиальной особенностью метода моделирования технологии пирометаллургических процессов является обязательный учет в модели вещественного (минералогического, рационального) состава материалов и продуктов процесса, поведения в технологическом процессе всех участвующих в нем компонентов (химических элементов) исходных материалов и формирование материального баланса процесса, в котором балансируются все эти компоненты. Такой подход обеспечивает наибольшую достоверность результатов расчетов, выполненных по модели и позволяет обосновано судить о влиянии различных факторов на показатели технологического процесса [2, 4].

Однако реализация упомянутых выше принципов моделирования требует наличия достаточно полных и достоверных данных о химическом и минералогическом составе исходных материалов процесса. В этой части при составлении модели по заводским данным обычно возникают проблемы. Не обошлось без них, как будет видно из дальнейшего, и при моделировании технологии электроплавки.

Структура балансовой статистической модели и балансовая схема технологического расчета приведены в Приложении 1. Модель технологии электроплавки брикетированного концентрата включает следующие структурно-смысловые блоки: 1) вещественного состава исходных материалов; 2) количественного состава шихты; 3) первичных превращений шихты; 4) количествен-

© 2012, Math Designer

ных составов пыли и неучитываемых потерь; 5) количественного состава штейна, шлака и флюса; 6) количественного состава технологических газов.

Шихта электропечи представлена рудной частью, кремнистым флюсом и восстановителем. Продукты электроплавки - это отвальный шлак и штейн. Последний является целевым продуктом и направляется в конвертер для последующей переработки. Помимо штейна РТП в конвертер загружается и кварцевый флюс. Продукты конвертирования - файнштейн, содержащий в большом количестве цветные металлы и их сульфиды и конвертерный шлак, в жидком виде заливаемый в рудно-термическую печь. Поскольку он является оборотным продуктом, решение модели технологии возможно только численным итерационным методом, что и было реализовано в программной среде Turbo Pascal [12, 14].

При разработке модели блока вещественного состава исходных материалов в качестве последних, кроме основного материала – брикетированного концентрата обогатительной фабрики, оборотного конверторного шлака и восстановителя, а также собственной руды и обоженных окатышей, учитывался ряд материалов, поступающих в плавку со стороны, а также собственные обороты. Для большей универсализации модели, учитывая практику работы плавильного цеха, в качестве «сторонних» металлосодержащих материалов в блок были включены «медный» (медно-никелевый) шлак «Североникеля», Уфалейский и Режский штейны, норильская руда. В блоке также фигурирует кварцевый флюс (песок) [10, 11].

К сожалению, несмотря на включение в модель указанного ряда исходных материалов, этого оказалось недостаточно для воспроизведения всей картины снабжения сырьем плавильного цеха. Эта картина на протяжении конца 2001 года и начала 2002 года непрерывно изменялась – в качестве исходных материалов как электроплавки, так и конвертирования периодически появлялись новые виды сырья – анодный шлак и илы комбината «Североникель», привозные металлоотходы, зачистки со склада сырья и другие материалы.

Вносить соответствующие изменения и дополнения в модель при появлении каждого нового вида сырья не представлялось возможным, поэтому содержание модели отвечает состоянию с сырьем на середину 2001 года.

Наибольшее внимание при разработке модели вещественного состава уделено минералогии брикетированных концентратов в той степени, в которой она может оказать влияние на показатели технологии электроплавки. С этой точки зрения существенным может оказаться минералогический состав силикатной части концентратов. В рудах она представлена первичными оливинами и пироксенами и продуктами их изменения – серпентином, тальком, серицитом, хлоритом, амфиболами, биотитом и другими. Соотношения между этими минералами в разных участках месторождения различны; кроме того, многие из них имеют переменный химический состав. При обогащении руд разные минералы распределяются между продуктами обогащения по-разному. Всё это создаёт большую неопределённость в минералогическом составе силикатной части концентрата и, соответственно, брикетов. Поскольку, однако, для процесса плавки полная номенклатура компонентов пустой породы не имеет большого значения, в составе брикетов были приняты силикатные минералы, присутствующие в основной массе руд в наибольших количествах: серпентин, оливин, тальк и хлорит. Соотношения между их содержаниями в модели может задаваться в зависимости от конкретных данных по вещественному составу флотационного концентрата. Поскольку из четырёх названных силикатов в оливине могут изоморфно замещаться магний и железо, а в хлорите – магний, железо, алюминий и кремний, соотношения между этими металлами также в принципе должно задаваться [3, 9]. Однако, как правило, такими данными производство не располагает; поэтому в модели приняты определённые упрощения.

Из алюмосиликатов в модели учтён только хлорит, содержание которого может быть рассчитано по содержанию $Al_2O_3$ в концентрате. Было принято, что последний представлен изоморфно замещёнными железом, алюминием и

кремнием и выражается формулой $(Fe_2Al_2)[Si_3AlO_{10}](OH)_8$. Для оливина принята формула $FeMgSiO_4$. Из силикатной части концентрата обычно повышенное внимание уделяется тальку – единственно хорошо флотируемому силикату. Поэтому содержание талька в концентрате должно быть известно. Если нет – соотношение между ним и серпентином, принимается по общим данным.

В модели проигнорировано наличие в руде небольших содержаний кальциевых силикатов групп пироксенов и амфиболов – весь содержащийся в концентрате кальций отнесён к несиликатной части пустой породы – к кальциту, который присутствует в руде в заметных количествах. Не учтены также небольшие содержания полевых шпатов и биотита; содержащиеся в них оксиды щелочных металлов отнесены к «прочим». К «прочим» были отнесены также содержащиеся в малых количествах хромит и ильменит.

Из свободных оксидов в составе брикетов были учтены магнетит и кварц. Первый фактически присутствует в руде и концентрате в заметных количествах, второй – в очень небольших. Учёт последнего в вещественном составе вызван игнорированием в нем немагнезиальных силикатов: после «увязывания» магния в серпентин, оливин и тальк остающийся диоксид кремния принят в форме кварца.

Весь никель в брикетах был принят в форме пентландита. Фактическое наличие части никеля в никелистом пирротине не учитывалось ввиду незначимости этого обстоятельства для рудной плавки. Медь целиком принята в форме халькопирита по тем же соображениям. Кобальт ввиду его малого содержания условно принят в форме простого сульфида. Вся сера, не связанная в сульфиды цветных металлов, взята в форме пирротина. Для пентландита и пирротина приняты (как это обычно делается) упрощенные химические формулы минералов – $NiFeS_2$ и $Fe_7S_8$.

Алгоритм расчета по модели вещественного состава концентрата по заданному химическому составу предусматривает определение по $Al_2O_3$ и MgO

и заданному соотношению между силикатами содержания последних. Не связанный при этом диоксид кремния дает содержание кварца. По оксиду кальция рассчитывается количество кальцита. По содержаниям цветных металлов определяется концентрация пентландита, халькопирита и сульфида кобальта. По не связной в них сере рассчитывается пирротин. Железо, не учтенное в тальке, оливине, пентландите, халькопирите и пирротине, дает содержание магнетита. По содержаниям хлорита, серпентина и талька определяется кристаллизационная влага, по кальциту – диоксид углерода, по магнетиту – не связанный в другие соединения кислород. Остаток (до 100%) отнесен к «прочим».

Приведенная модель определения вещественного состава брикетированного концентрата принята и для собственной руды (как возможной шихтовой составляющей плавки). Поскольку, флотируемость различных силикатов в процессе обогащения руд различна, при определении состава руды в исходных данных должно быть принято иное соотношение между силикатами, чем при расчете брикетированного концентрата. В частности, поскольку из силикатов тальк обладает повышенной флотационной активностью, его доля по отношению к другим силикатам должна быть в руде ниже, чем в концентрате.

«Медный» шлак «Североникеля» фактически в основном представляет собой смесь собственно «сухого» никелевого шлака медных конвертеров с механически увлеченной металлической медью. Медь принята в модели в шлаке в трёх формах: металлической меди, куприта $Cu_2O$ и сульфида $Cu_2S$. Количество последнего мало и определяется общим содержанием серы в шлаке; считается, что сера связана только с медью. Соотношение между металлической медью и медью куприта должно быть принято по результатам анализа; в общем случае его можно считать близким единице.

Железо в медном шлаке представлено оксидами Fe II и Fe III . Соотношение между ними может быть различно. В модели без большой погрешности

может быть принята одна форма – $Fe_2O_3$, так как оксидная медь в значительной степени связана в феррит.

Никель и кобальт в шлаке находятся целиком в окисленной форме. Они, а также шлакообразующие ($SiO_2$, CaO, MgO, $Al_2O_3$), приняты в форме свободных оксидов, что общепринято для продуктов пирометаллургической переработки.

Вещественный состав медно-никелевого штейна «Североникеля» по своей структуре идентичен штейну РТП «Печенганикеля», хотя и отличается от него содержаниями компонентов. Кроме сульфидов никеля, кобальта, меди и железа в штейне присутствует металлическая фаза. В модели вся металлизация штейна отнесена на счет главного источника металлизации - железа.

При составлении модели содержания сульфидов цветных металлов в штейне определялись по содержаниям самих металлов; по остающейся сере находилась содержание железа. Оставшееся железо принималось в металлической форме.

Все сказанное о модели вещественного состава штейна «Североникеля» в принципе относится и к штейну уральских заводов (уфалейскому, режскому). Разница состоит в отсутствии в составе последних меди и в большей их металлизации.

Привозная норильская руда представляет собой сплошную сульфидную руду талнахских месторождений, существенно отличающуюся от собственных руд «Печенганикеля» не только высоким содержанием в ней сульфидов, но и составом пустой породы. Последняя представлена в основном пироксенами, амфиболами и оливином, а также магнетитом. В принципе определить в модели содержание указанных силикатов по концентрациям $SiO_2$, CaO и MgO не создает особых проблем при некоторых допущениях, однако для последующих расчетов это практически не имеет значения, так как, во-первых, общее содержание пустой породы в сплошной норильской руде обычно не превыша-

© 2012, Math Designer

ет 20 – 25%, и, во-вторых, её переработка в РТП плавильного цеха при наличии брикетированного концентрата если и будет производиться, то лишь эпизодически и в небольших количествах. Поэтому в модели взят в отношении пустой породы норильской руды упрощенный вариант – все компоненты приняты в форме свободных оксидов. При этом, исходя из практических данных, принимается соотношение в содержаниях железа в форме магнетита и в форме FeO (фактически входящего в состав оливина).

Сульфидная часть норильской руды отличается от печенгской прежде всего наличием, наряду с халькопиритом, значительного количества кубанита. Соотношение между медью в этих сульфидах принимается по практическим данным. В остальном модель в своей сульфидной части такая же, как для собственного концентрата (или руды). Железо, остающееся после связывания в сульфиды, считается оксидным и распределяется между магнетитом и FeO.

В вещественном составе восстановителя, в качестве которого может использоваться коксовая мелочь или антрацитовый штыб, в форме свободных элементов приняты углерод, сера и азот. В составе золы восстановителя учтено содержание наиболее характерных для зол каменных углей различных месторождений главных компонентов: оксидов кремния, железа и алюминия. Остальные компоненты золы отнесены к «прочим». В составе восстановителя учтена также гигроскопическая влажность, которая для каждого сорта каменного угля является справочной величиной.

Вещественные составы всех исходных материалов сведены в модели в таблицы по каждому материалу. Модель блока количественного состава шихты получена путем простого суммирования масс отдельных компонентов, входящих в исходные материалы электроплавки. При этом отдельно составлялся количественный состав металлосодержащей твердой шихты, что соответствует структуре технических отчетов плавцеха.

Масса каждого компонента шихты определяется выражением [2, 4]

© 2012, Math Designer

$$m_{ik} = \sum_{j=1}^{n} m_{ij} = \sum_{j=1}^{n} (0{,}01 \cdot c_{ij} \cdot m_j)\text{, m, кг} \qquad (1.4)$$

где $m_{ij}$ и $c_{ij}$ – соответственно масса, и концентрация, % i-ого компонента (соединения) в j-ом материале; $m_j$ – масса j-ого материала.

При составлении модели учитывалось два возможных варианта проведения технологии: с применением в электроплавке кварцевого флюса с целью получения шлака с заданным содержанием кремнекислоты и без использования флюса с получением самоплавкого шлака. Сейчас плавка часто осуществляется по второму варианту, однако при плавке брикетов бесфлюсовая плавка может оказаться неприемлемой. Поэтому модель предусматривает расчет технологии в обоих вариантах. В случае флюсовой плавки в неметаллосодержащей части шихты учитываются два материала: восстановитель и флюс.

Все массы исходных металлосодержащих твердых материалов $m_j$ являются заданными; базовой величиной при этом служит заданная производительность по брикетированному концентрату.

Учет в модели состава и массы конвертерного шлака, направляемого в электроплавку, является особым вопросом, так как эти состав и масса определяются конечным продуктом самой электроплавки (штейном). Характеристики конвертерного шлака могут быть определены только в результате составления сквозной модели технологии плавильного цеха. Сквозная модель делает состав и массу конвертерного шлака известными и позволяет включить их в блок количественного состава шихты.

Масса потребного флюса, задаваемого в шихту электроплавки (в случае флюсовой плавки), фигурирует в модели количественного состава шихты как неизвестная величина, которая находится в результате решения всей модели.

В блоке первичных превращений шихты в модели учитываются реакции кальцинации и диссоциации компонентов шихты. К реакциям кальцинации отнесены реакции разложения водных силикатов – серпентина, талька и хло-

© 2012, Math Designer

рита. Реакции диссоциации представлены разложением высших сульфидов с образованием низших ( $Ni_3S_2, Cu_2S, FeS$ ) и элементарной серы.

В результате реализации блока идущая в дальнейшую переработку шихта оказывается представленной только свободными металлами, низшими сульфидами и простыми оксидами: $Cu_{мет}$, $Cu_2S$, $Cu_2O$, NiO, $Ni_3S_2$, CoO, CoS, $Fe_{мет}$, FeO, $Fe_3O_4$, $Fe_2O_3$, $SiO_2$, CaO, MgO, $Al_2O_3$ и «прочими».

Поскольку пылевынос при электроплавке весьма невелик и при переработке медно-никелевых шихт представлен практически полностью механическим уносом, учет в модели пылевыноса в любом случае может быть существенно упрощен. В рассматриваемой модели улавливаемая в газоходном тракте пыль РТП подшихтовывается к исходной загрузке, и поэтому в модели должны быть учтены только мелкие фракции пыли, безвозвратно теряемые с выбрасываемыми через дымовую трубу печными газами. Поскольку в перспективе, при герметизации электропечей и направлении газов в сернокислотное производство, эти потери будут сведены к минимуму, отдельный учет пылевыноса в данной модели технологии не имеет смысла, и вместо него целесообразно рассматривать просто некоторые неучитываемые, безвозвратные потери шихты, обусловленные просыпями, выбросами запыленного газа через отдельные отверстия в печи при нарушении нормального газового режима и т.п.

Так как детерминированный расчет этих потерь невозможен, они должны определяться исключительно по данным заводской практики. При этом, ввиду незначительности потерь, имеет смысл учитывать в них лишь цветные металлы, не затрагивая других компонентов шихты. Чтобы не нарушать стехиометрию соединений, в модели безвозвратные потери этих металлов отнесены к простым сульфидам никеля, кобальта и меди, которые входят в состав шихты, претерпевшей первичные превращения. Масса потерь каждого из этих сульфидов определяется как доля от их содержания в шихте.

© 2012, Math Designer

В результате учета безвозвратных потерь в остатке получается количественный состав шихты, идущей на образование штейна и шлака.

Структура блока количественного состава штейна и шлака в определенной степени зависит от того, флюсовой или бесфлюсовой является плавка. В первом случае должно быть задано содержание $SiO_2$ в шлаке, и масса потребного флюса при этом является задачей определения. Во втором случае содержание кремнекислоты в шлаке находится в результате решения модели.

В принципе структура модели по первому варианту пригодна и для бесфлюсовой плавки. В этом случае, получая в результате решения некоторое количество потребного флюса при заданном содержании $SiO_2$ в шлаке, можно, последовательно уменьшая величину этого содержания, путем ряда пересчетов придти к массе флюса, равной нулю, то есть к бесфлюсовой плавке. Этот путь, однако, требующий времени, малопривлекателен. Поэтому модель количественных составов штейна и шлака разработана в двух вариантах; любой из них выбирается по потребности.

Модель блока количественных составов штейна и отвального шлака РТП базируется на детерминированном учете механизма штейно- и шлакообразования и на количественных соотношениях, в большинстве своем достаточно надежно характеризующих технологию электроплавки медно-никелевой шихты на слабометаллизированный штейн. В качестве базовых неизвестных величин, подлежащих определению в модели, приняты массы получаемых штейна и шлака. В варианте флюсовой плавки к ним добавляется масса потребного флюса. От значений этих базовых неизвестных зависят массы всех компонентов, входящих в штейн, шлак и флюс. Эти массы в большинстве случаев определяются через массовые содержания (концентрации) компонентов в штейне, шлаке и флюсе. Причем в последнем концентрации известны из его вещественного состава, а для штейна и шлака – назначается или определяются особо.

© 2012, Math Designer

Главными при этом являются данные по распределению цветных металлов между штейном и шлаком. В модели эти данные представлены найденными выше регрессионными уравнениями, определяющими концентрацию никеля, кобальта и меди в шлаках РТП в зависимости от главных влияющих на них факторов - содержания железа в штейне и кремнекислоты в шлаке. Указанные уравнения позволяют определить массы цветных металлов в шлаке, а через них – и массы этих металлов в штейнах.

Поскольку основная часть серы в шлаках РТП связана с железом, определенное значение для результатов расчетов имеет аргументированное определение общего содержания серы шлака, что позволяет учесть количество сульфидного железа. Известно, что растворимость FeS в шлаках зависит от кислотности шлака – с повышением последней эта растворимость снижается. В связи с этим были обработаны заводские данные по зависимости общего содержания серы в электропечных шлаках от содержания в них кремнекислоты. В результате получена практически линейная зависимость между этими величинами, которая достаточно хорошо аппроксимируется уравнением

$$(S)_{ш} = 6{,}38 - 0{,}144\,(SiO_2)_{ш,} \qquad (1.5)$$

где $(S)_{ш}$ и $(SiO_2)_{ш}$ - содержание в шлаке, соответственно, общей серы и кремнекислоты; % масс.

Вышесказанное определило всю сульфидную часть шлака РТП.

Поскольку при восстановительной плавке на металлизированные штейны трехвалентное железо, содержащееся в шихте (магнетит, гематит), практически полностью восстанавливается, в модели принято, что в шлаке отсутствует магнетит и оксидное железо полностью представлено вюститом. Масса последнего в шлаке определяется из общего баланса железа в процессе.

Остальные шлакообразующие – $SiO_2$, CaO, MgO, $Al_2O_3$ полностью переходят в шлак из исходной шихты (при флюсовой плавке – включающей флюс). «Прочие» шлака находятся из их общего баланса в процессе, исходя из принятого содержания «прочих» в штейне.

© 2012, Math Designer

В штейне массы цветных металлов (все – в форме сульфидов) находятся из их баланса в процессе, исходя из того, что их количество, как указывалось, определено в шлаке. Таким образом, последними величинами, определяющими количество штейна, являются его металлизация и содержание сульфида железа (содержание «прочих», как говорилось, принимается, – на уровне 1 – 2%). Эти две величины являются наименее аргументированными в модели, так как зависят от большого числа факторов, многие из которых не могут быть количественно описаны.

Металлизация штейна зависит от удельного расхода восстановителя, его качества, содержания в шихте и ванне оксидов железа, условий контакта восстановителя с твердой шихтой и шлаковой ванной, температуры и др. Учесть все эти факторы при определении металлизации штейна не представляется возможным, однако практика работы РТП плавцеха показывает, что, в общем, величина металлизации штейна рудных электропечей при существующих удельных расходах восстановителя колеблется в сравнительно узких пределах, составляя в большинстве случаев 8 –12%. При этом увеличение доли в шихте обожженных окатышей, содержащих большое количество высших оксидов железа, ведет при прочих равных условиях к увеличению металлизации штейнов. При плавке необожженных брикетов металлизация, соответственно, должна несколько снизиться. В модели, таким образом, величина металлизации штейна принимается, исходя из этих общих соображений.

Количество сульфида железа в штейне определяется разницей между поступившим FeS из твердой и конвертерного шлака и расходом FeS на содержание в отвальном шлаке и окисления этого сульфида. Именно последняя статья характеризуется некоторой неопределенностью.

Окисление сульфида железа при электроплавке обусловлено его взаимодействием с трехвалетним железом, например, магнетитом:

$$FeS + 3Fe_3O_4 \rightarrow 10FeO + SO_2. \qquad (1.6)$$

© 2012, Math Designer

Однако трехвалентное железо восстанавливается в РТП не только за счет сульфида железа, но и за счет углеродистого восстановителя. При этом, чем больше доля этого последнего восстановления, тем меньше развита реакция (1.6) и больше сульфида железа перейдет в штейн.

Здесь так же, как и в случае с металлизацией штейна, действуют многие факторы, и аргументированно учесть долю каждой реакции не представляется возможным. Ориентировочные расчеты, проведенные на заводских данных, однако показывают, что превалирующим процессом восстановления трехвалентного железа является в РТП взаимодействие его с углеродом восстановителя, а не с сульфидом железа. На долю последнего приходится обычно не более 15 – 30% восстановленного Fe III. Этот уровень значений и принят в модели для расчета реакции (1.6).

Все сказанное позволило сформировать в модели систему уравнений, которая определяет массу штейна и шлака, а также флюса (в варианте флюсовой плавки). Каждое базовое уравнение этой системы содержит в левой части базовое неизвестное (искомую массу), а в правой – сумму компонентов, слагающих данный продукт (или флюс).

Модель блока количественного состава технологических газов формируется чисто формально на основе полученных количественных составов исходных материалов и основных конечных продуктов. В технологические газы переходит вся кристаллизационная влага водных силикатов шихты, влага восстановителя и диоксид углерода карбоната кальция. По реакции (1.6) находится диоксид серы в газах, по реакциям восстановления углеродом оксидов железа – масса выделяющегося при этом диоксида углерода. Условно принято, что технологические газы не испытывают воздействия подсосов воздуха и других окислителей; таким образом в этих газах диссоциирующая сера высших сульфидов находится в элементарном виде. В модели, далее, учтена внешняя влага поступающих материалов – брикетов, руды, флюса и др.

© 2012, Math Designer

Поступление в электроплавку оборотного конвертерного шлака не позволяет при моделировании технологии электроплавки ограничиться моделью только самой электроплавки, так как количество и состав поступающего в плавку конвертерного шлака в этом случае не могут быть обоснованы. Решение задачи в этом случае состоит в разработке т.н. сквозной модели плавильного цеха, которая в данных условиях должна быть представлена двумя взаимосвязанными переделами – электроплавкой и конвертированием. Взаимосвязь указанных переделов выражается в увеличении базовых неизвестных: помимо масс штейна, отвального шлака и электропечного флюса в сквозной модели должны фигурировать конвертерный шлак, файнштейн и конвертерный флюс. Все эти составляющие и формируют систему уравнений сквозной модели.

Несмотря на неразрывную взаимосвязь и взаимообусловленность обоих переделов в сквозной модели цеха, само строение моделей каждого из переделов независимо и подчиняется собственной логике. Поэтому все сказанное выше о модели технологии электроплавки остается в силе и для сквозной модели в части этого передела.

То же самое в принципе относится и к модели конвертерного передела. Здесь, однако, есть существенная особенность. Конвертирование – сугубо периодический процесс, и на каждом его этапе технологические показатели оказываются различными. Применительно к сквозной модели это сказывается, прежде всего, на конверторном шлаке. Его состав по ходу отдельных продувок меняется, в первую очередь по содержанию цветных металлов, и в сквозной модели это обстоятельство вносит неопределенность.

Реализация этой конвертерной модели требует разбивки всего процесса на отдельные продувки разной продолжительности, причем задание времени каждой очередной продувки (особенно в конце набора и при холостых продувках) основано на анализе результатов предыдущей. Для сквозной модели цеха эта методика неприемлема, так как эта модель должна характеризовать

показатели технологии в целом. Поэтому стандартную модель конвертирования в данной работе пришлось реконструировать.

Суть проблемы состоит в том, что состав конвертерного шлака перед каждым его сливом определяется конечным составом сульфидной массы данной продувки, над которой получен этот шлак. Регрессионные зависимости, полученные в предыдущей работе, дают возможность определить состав этой порции шлака. Однако, поскольку масса от продувки к продувке обогащается, изменяется и состав сливаемого шлака. В сквозной модели, которая по своей сути является статической, указанная динамика неприемлема – в данном случае необходимо учитывать осредненный состав всего конвертерного шлака.

В реконструированной модели конвертирования весь процесс условно разбивается на короткие продувки равной заданной продолжительности. Для каждой продувки рассчитывается состав сульфидной массы и для нее – состав и количество шлака. Эти просчеты делаются вплоть до получения файнштейна. Суммированием масс шлака и его компонентов по всем продувкам определяются масса и средний состав всего конвертерного шлака.

В таком реконструированном виде модель технологии конвертирования была увязана с моделью электроплавки. Вместе они составляют сквозную модель плавильного цеха.

По описанной модели была составлена компьютерная программа на языке программирования Turbo Pascal 7.1. Она позволяет варьировать в широких пределах состав исходного сырья плавильного цеха как по массам отдельных его составляющих, так и по химическому составу последних. Кроме того, в исходных данных можно изменять те величины, которые задаются в зависимости от конкретных особенностей сырья или технологии процесса – соотношение в содержании отдельных минералов рудной части шихты, расход восстановителя, металлизацию штейна, содержание прочих в штейне и файнштейне и т.д.

© 2012, Math Designer

В выдаваемых на печать результатах решения модели даются развернутые составы всех исходных материалов, поступающих на переработку в плавильный цех, и получающихся в цехе продуктов, включая межпередельные, – файнштейна, отвального шлака и штейна РТП, конвертерного шлака и технологических газов РТП и конвертирования. По каждому материалу результаты решения даются в форме двух таблиц: процентного состава (название таблицы – «вещественный состав») и массы (название – «массовый состав»). По каждому переделу и по цеху в целом приводятся развернутые поэлементные материальные балансы.

## 1.3. Разработка модели энергетики электроплавки брикетированного концентрата

С переходом на плавку брикетированного концентрата изменится вещественный состав шихты, что приведет к перераспределению балансов между химическими реакциями, что приведет к изменению энергетических затрат.

Модель энергетики электроплавки брикетов основана на результатах решения модели технологии процесса и на тепловых характеристиках работы РТП.

В самом общем виде основным выражением модели энергетики плавки является уравнение энергетического баланса печи [9]:

$$W_{уд} \cdot m_{ших} + i_{кш} \cdot m_{кш} + Q_{эл} + Q_s = i_{шт} \cdot m_{шт} + i_{ш} \cdot m_{ш} + \\ + i_г \cdot V_г + Q_{энд} + Q_{исп} + Q_{пот} + W_{пот} \cdot m_{ших} \qquad (1.7)$$

где $W_{уд}$ - удельный расход электроэнергии на плавку (на переработку единицы массы шихты), кДж/т; $m_{ших}$ - масса шихты, т; $i_{кш}$, $i_{шт}$, $i_{ш}$- энтальпии, соответственно, конвертерного шлака, штейна, отвального шлака, кДж/т; $m_{кш}$, $m_{шт}$ , $m_{ш}$ - массы, соответственно, конвертерного шлака, штейна, отвального шлака, т; $i_г$, $V_г$ - соответственно, энтальпия и объем отходящих печных газов, кДж/м$^3$ и м$^3$; $Q_{эл}$ - теплота горения электродов, кДж; $Q_s$ - теплота окисления диссоциирующей серы, кДж; $Q_{энд}$ - теплота эндотермических реакций, кДж; $Q_{исп}$ -

теплота на нагрев и испарение внешней влаги, кДж; $Q_{пот}$ - потери теплоты печью во внешнюю среду, кДж; $W_{пот}$- удельные электрические потери в схеме электропитания печной установки, кДж/т.

Наиболее значимое влияние на удельный расход электроэнергии при электроплавке оказывает тепло химических реакций, протекающих в печи.

Определение в модели теплоты большинства эндотермических реакций, вносящих заметный вклад в энергетику плавки, проводилось по общепринятой методике через энтальпии образования соответствующих соединений при температуре процесса [6]. Некоторую неопределенность в результаты вносит отсутствие термохимических данных по отдельным соединениям, таким как пентландит, кубанит и др. Здесь приходится пользоваться приближенными методами, принятыми в подобных расчетах.

Зависимости термодинамических эффектов от температуры были рассчитаны для 12 основных реакций в ходе выполнения работы по ХД 31/2000. Полученные результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1.

**Термодинамические эффекты протекания реакций в электропечи**

| № п/п | Уравнение реакции | Термодинамический эффект |
|---|---|---|
| 1 | $3NiFeS_2 \rightarrow Ni_3S_2 + 3FeS + 0{,}5S_2$ | $Q_{уд}$ = 486,087 |
| 2 | $2CuFeS_2 \rightarrow Cu_2S + 2FeS + 0{,}5S_2$ | $Q_{уд}$ = 259,582 |
| 3 | $2CuFe_2S_3 \rightarrow Cu_2S + 4FeS + 0{,}5S_2$ | $Q_{уд}$ = 58,615 |
| 4 | $Fe_7S_8 \rightarrow 7FeS + 0{,}5S_2$ | $Q_{уд}$ = 40,151 |
| 5 | $CoO + FeS \rightarrow CoS + FeO$ | $Q_{уд}$ = -0,0047 · T – 25,263 |
| 6 | $Cu_2O + FeS \rightarrow Cu_2S + FeO$ | $Q_{уд}$ = 0,0012 · T - 72,636 |
| 7 | $2Cu + FeS \rightarrow Cu_2S + Fe$ | $Q_{уд}$ = 0,0125 · T + 19,995 |
| 8 | $NiO + FeS \rightarrow NiS + FeO$ | $Q_{уд}$ = 0,0025 · T - 27,345 |
| 9 | $Fe_2O_3 + 1{,}5C \rightarrow 2Fe + 1{,}5CO_2$ | $Q_{уд}$ = -0,0016 · T + 226,91 |
| 10 | $FeO + 0{,}5C \rightarrow Fe + 0{,}5CO_2$ | $Q_{уд}$ = -0,0074 · T + 74,318 |

© 2012, Math Designer

| № п/п | Уравнение реакции | Термодинамический эффект |
|---|---|---|
| 11 | $Fe_2O_3 + 0{,}5C \rightarrow 2FeO + 0{,}5CO_2$ | $Q_{уд}$ = -0,0065 · T + 89,926 |
| 12 | $3Fe_2O_3 + FeS \rightarrow 7FeO + SO_2$ | $Q_{уд}$ = -0,0150 · T + 388,86 |

Приведенные в таблице данные были учтены при составлении компьютерной программы, что позволило определять общие затраты энергии на химические превращения шихты при электроплавке и анализировать изменение этого показателя при плавке сырья различного состава.

# Глава 2. ИЗМЕНЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПЛАВЦЕХА ГМК «ПЕЧЕНГАНИКЕЛЬ» ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА НОВЫЙ ВИД СЫРЬЯ

Результаты расчета технологии цеха на существующем сырье (основные исходные материалы – собственная руда и обожженные окатыши) и при переработке брикетированного концентрата среднего состава (см. табл. 3) в работе не представлены ввиду большого их объема (они могут быть без труда найдены в отчете по ХД 14.00/99, куда они вошли полностью.). Для примера взят набор сырья плавильного цеха (на сухую массу) за апрель месяц 2001 года.

## 2.1. Изменение технологических показателей плавцеха при переходе на брикеты

### *2.1.1. Состав исходного сырья*

Основными составляющими шихты электропечи плавильного цеха «Печенганикеля» при действующей технологии являются, как уже отмечалось ранее, собственная руда, привозная норильская руда, окатыши цеха обжига, медно-никелевый шлак и штейн комбината «Североникель», кобальтовый уфалейский штейн восстановитель и кварцевый флюс. Помимо шихты в РТП загружают оборотный конвертерный шлак в жидком виде. В последнее время в состав шихты электропечи стали включать и иные материалы: зачистки лежало-

© 2012, Math Designer

го сырья, анодный шлак и илы комбината «Североникель», привозные металлоотходы и другие материалы. Данные об их химико-минералогическом составе отсутствуют.

В приведенном расчете переработки существующей шихты в качестве исходных взяты данные работы плавцеха за апрель 2001 года. В этом месяце набор сырьевых материалов цеха в наибольшей степени отвечал набору, который предусмотрен моделью технологии. Как уже отмечалось выше, последний год работы цеха характеризовался большими вариациями в составе исходного сырья, причем чуть ли не в каждом месяце в наборе исходных материалов появлялся какой-нибудь новый материал. Естественно, что разработанная модель не могла «угнаться» за этими изменениями, что затрудняет сопоставление результатов расчетов с физическими показателями.

В исходном сырье цеха за апрель 2001 год только одна составляющая не предусмотрена в модели – «зачистка лежалого сырья». Эту составляющую пришлось полностью исключить из расчета, так как по приведенным в техотчете цеха данным она не отвечала другим видам сырья (в ней дается только содержание никеля – 1,83% и кобальта – 0,08%; медь отсутствует вовсе; данные по остальным компонентам отсутствуют).

Элементарный состав сырья, поступающего на электроплавку, соответствующий результатам лабораторных анализов за апрель 2001 года приведен в табл. 2.

Таблица 2.

**Химический состав сырья электроплавки**

| **Материал** | **Содержание, %** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Ni** | **Cu** | **Co** | **Fe** | **S** | **SiO2** | **$Al_2O_3$** | **CaO** | **MgO** |
| Собственная руда | 2,2 | 1,0 | 0,057 | 21,34 | 10,4 | 30,3 | 0 | 3,33 | 11,4 |
| Окатыши | 7,44 | 3,61 | 0,25 | 31,39 | 14,3 | 18,7 | 0 | 0,66 | 12,77 |
| Норильская руда | 2,43 | 2,43 | 0,12 | 27,29 | 16,6 | 24,37 | 0 | 6,1 | 3,37 |
| Шлак Североникеля | 14,63 | 33,82 | 0,897 | 15,0 | 0,46 | 5,96 | 0 | 0,34 | 6,0 |
| Штейн Североникеля | 17,72 | 11,49 | 0,752 | 41,61 | 23,2 | - | - | - | - |
| Кобальтовый штейн | 8,7 | 0 | 0,875 | 58,36 | 24,8 | - | - | - | - |
| Кварцевый флюс | - | - | - | 3,63 | - | 63,81 | 11,57 | 4,18 | 2,07 |

| | **C** | **$N_2$** | **$H_2$** | **S** | **$H_2O$** | **Зола** |
|---|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Восстановитель | 78,2 | 2,2 | 0,3 | 1,3 | 4,6 | 13,4 |

Состав брикетированного концентрата, который в скором времени заменит в шихте электроплавки собственную руду и окатыши, может быть весьма различным (табл. 3).

В разрабатываемой НИИ «Гипроникель» технологии получения брикетированного концентрата в качестве основного состава брикетов рассматривается состав № 1 [13].

Таблица 3.

**Химический состав брикетированного концентрата**

| № состава п/п | Содержание , % | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Ni** | **Cu** | **Co** | **Fe** | **S** | **$SiO_2$** | **$Al_2O_3$** | **CaO** | **MgO** |
| 1 | 9.64 | 8.5 | 0.32 | 30.0 | 24.0 | 12.26 | 0.84 | 0.60 | 8.6 |
| 2 | 9.00 | 8.5 | 0.32 | 30.5 | 24.0 | 12.26 | 0.84 | 0.60 | 8.6 |
| 3 | 5.60 | 3.6 | 0.18 | 20.7 | 13.0 | 24.30 | 0.84 | 0.53 | 14.7 |
| 4 | 6.80 | 3.7 | 0.23 | 24.7 | 15.9 | 21.50 | 0.84 | 0.49 | 15.4 |
| 5 | 7.70 | 4.2 | 0.26 | 27.1 | 18.3 | 19.10 | 0.84 | 0.35 | 10.5 |
| 6 | 8.80 | 4.3 | 0.33 | 29.8 | 20.4 | 16.20 | 0.84 | 0.29 | 8.9 |
| 7 | 8.50 | 2.6 | 0.33 | 27.7 | 17.9 | 17.30 | 0.84 | 0.46 | 12.9 |
| 8 | 6.70 | 3.7 | 0.24 | 23.7 | 15.2 | 23.20 | 0.84 | 0.55 | 13.6 |
| Средн. | 7.84 | 4.89 | 0.28 | 26.78 | 18.59 | 18.27 | 0.84 | 0.48 | 11.65 |

Проведем сравнительный анализ химических составов компонентов сырья при переходе на плавку брикетов. Для этого определим среднее удельное содержание цветных металлов, железа, серы и оксидов в смеси руды и окатышей в соответствии с действующей технологией. Согласно техническому отчету плавцеха за апрель 2001 года, среднее соотношение между собственной рудой и окатышами в этом месяце составило 1 : 1,283 или в долях единицы 0,438 : 0,562. Умножив процентное содержание каждого из компонентов собственной руды и обожженных окатышей (табл. 2) на соответствующий коэффициент и сложив их, получим их содержание в смеси (табл. 4).

Таблица 4.

**Химический состав смеси собственной руды и обожженных окатышей**

| **Материал** | **Содержание, %** |
|---|---|

© 2012, Math Designer

| | Ni | Cu | Co | Fe | S | SiO2 | $Al_2O_3$ | CaO | MgO |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Руда и окатыши | 5,14 | 2,47 | 0,17 | 26,99 | 12,59 | 23,78 | 0,00 | 1,83 | 12,17 |

Следует учитывать, что корректное сопоставление расчетных результатов по переработке существующей шихты и брикетированного концентрата, вообще говоря, невозможно, так как нельзя полагать, что из собственной руды, поступающей сейчас на плавку, и из концентрата, идущего сейчас на получение обожженных окатышей, получится на обогатительной фабрике в сумме тот концентрат, который идентичен по массе и составу принятому в расчете брикетированному концентрату.

Как можно заметить, состав смеси руды и окатышей значительно отличается от всех приведенных в табл. 3 составов брикетов и в особенности от состава № 1. Наиболее существенные отклонения от состава смеси наблюдается по содержаниям Ni, Cu, Co и MgO. Как можно заметить, приведенные в табл. 3 содержания отдельных компонентов имеют весьма широкие диапазоны варьирования, причем нельзя точно оценить, какой из этих составов будет впоследствии наиболее адекватен концентрату, получаемому на ГМК «Печенганикель». Для получения более точного состава брикетов, отвечающего имеющемуся сырью в условиях комбината «Печенганикель», необходимо включить в математическую модель технологии плавильного цеха расчет переработки указанного существующего сырья на брикетированный концентрат, что непременно должно быть сделано в последствии. Пока же, ввиду отсутствия более точных данных, в качестве основного состава при последующих расчетах для удобства сопоставления результатов из перечисленных в табл. 3 составов брикетированного концентрата выберем один из наиболее приближенных к составу смеси руды и окатышей – состав № 3.

Таблица 5.

**Вещественные составы исходного сырья**

| Руда собственная | | Окатыши | | Брикеты | |
|---|---|---|---|---|---|
| соединение | всего | соединение | всего | соединение | всего |
| NiFeS2 | 6.70 | Ni3S2 | 7.89 | NiFeS2 | 20.70 |

© 2012, Math Designer

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| CuFeS2 | 2.89 | | NiO | 2.10 | | CuFeS2 | 10.69 |
| CoS | 0.09 | | Cu2S | 4.52 | | CoS | 0.36 |
| Fe7S8 | 17.56 | | CoS | 0.39 | | Fe7S8 | 11.64 |
| Fe3O4 | 7.38 | | FeS | 30.56 | | Fe3O4 | 8.20 |
| серпентин | 18.70 | | Fe2O3 | 10.27 | | серпентин | 23.97 |
| оливин | 7.48 | | Fe3O4 | 6.62 | | оливин | 4.79 |
| тальк | 4.67 | | SiO2 | 18.70 | | тальк | 11.98 |
| CaCO3 | 5.94 | | CaO | 0.66 | | хлорит | 2.47 |
| SiO2 | 16.62 | | MgO | 12.77 | | CaCO3 | 0.87 |
| прочие | 11.97 | | прочие | 5.51 | | SiO2 | 1.10 |
| итого | 100.00 | | итого | 100.00 | | прочие | 3.23 |
| | | | | | | итого | 100.00 |

Сопоставление химического состава смеси руды и окатышей с данными о составах брикетов показывает, что последние имеют большее содержание серы, что является закономерным и не требует объяснений. Наблюдается и некоторое превышение содержания цветных металлов в брикетах, однако при иной шихтовке руды и окатышей содержание в них цветных металлов может быть повышено. Очевидно, что при переходе на плавку брикетов единственным изменением в составе исходного сырья, способным существенно сказаться на технологических показателях плавцеха и электропечного отделения в частности, является более высокое содержание серы в брикетированном концентрате, превышающее таковое в смеси руды и окатышей примерно в 1,5 раза.

Анализ вещественных составов собственной руды, обожженного и брикетированного концентратов показывает, что в содержания в брикетах таких минералов, как $NiFeS_2$, $CuFeS_2$ и тальку значительно выше, чем в собственной руде. По оксидам железа брикеты получаются несколько более бедными, чем смесь руды и окатышей (8,2 % в брикетах против, примерно, 12,5 % в смеси). Недостаток оксидного железа может сказаться на процессе электроплавки, вызывая снижение его содержания в шлаке РТП и повышая его магнезиальность. Наряду с оксидом железа наблюдается также недостаток кремнезема (всего 1,1 % против, примерно, 17 % в смеси). Это также может привести к чрезмерному увеличению содержания оксида магния в шлаке электропечи, особенно, если плавка ведется без добавления флюса и конвертерного шлака, являющихся ос-

новными источниками $SiO_2$ в процессе. Эти моменты еще будут рассмотрены и проанализированы более подробно в дальнейшем по результатам программного расчета.

На основе выбранных составов руды и окатышей (согласно техническому отчету за апрель 2001 года) и брикетов (состав № 3) был произведен программный расчет технологии плавильного цеха ГМК «Печенганикель». Полученные результаты приведены в ХД 14.00/99. Для сопоставления с существующей технологией, при расчете технологии переработки брикетов в исходных данных принята масса брикетов, равная суммарной массе руды и окатышей согласно техническому отчету за апрель 2001 года.

### *2.1.2. Изменение основных технологических показателей*

Для сопоставления технологических показателей плавильного цеха при переходе на плавку брикетов, проведен сравнительный анализ результатов программного расчета. Следует заметить, что состав продуктов электроплавки изменится не очень существенно. Штейн РТП, получаемый при плавке брикетированного концентрата имеет более высокое содержание сульфидов меди и никеля (соответственно 24,3 % и 16,5 % против 22,5 % и 13,6 % при переработке руды и окатышей). Несколько ниже в нем содержание сульфидов CoS и FeS (1,2 % и 47,0 % против 1,14 % и 51,8 %). Отвальный шлак, как и следовало ожидать, во втором случае имеет небольшой перевес в соотношении сульфидов и оксидов в сторону первых. Внимание стоит обратить только на рост магнезиальности шлака с 10,1 до 13,6 %, что не выходит за допустимые пределы. Шлак, получаемый при плавке без оборотного конвертерного шлака во втором случае отличается более низкими содержаниями FeO и CaO (12,81 % и 1,74 % против 19,14 % и 3,68 %). Содержание же MgO в нем весьма высоко (22,9 %).

При плавке брикетов, состав которых фактически идентичен составу флотоконцентрата (если не учитывать добавку в шихту брикетирования лигносульфанола), в твердой шихте, загружаемой в печь, помимо сульфидов со-

© 2012, Math Designer

держатся практически одни силикаты, причем в основном магниевые. Оксидного железа в этой шихте сравнительно мало, несравнимо меньше, чем при существующей шихте, содержащей обожженные окатыши с высоким содержанием этих оксидов. Поэтому при плавке брикетов железо электропечного шлака в значительной степени обязано своим наличием заливаемому в печь конвертерному шлаку. В его отсутствие образуется высокомагнезиальный шлак, имеющий высокую температуру плавления.

Поскольку заливка в печь конвертерного шлака производится периодически, в работе РТП могут иметь место отрезки времени, когда расплавление шихтовых откосов будет происходить при дефиците оксидов железа в шлаке, «растворяющем» материал откосов, и скорость плавления последних понизится. Это приведет к перегреву шлака в печи. Подобные явления тем более вероятны, учитывая, что плавление шихты происходит только по поверхности контакта шихтовый откос - шлак. При тугоплавкости материала откоса ограничения в его скорости плавления, накладываемые кинетикой тепломассообменных процессов на границе шихта-шлак, могут быть выражены значительно резче, чем при более легкоплавкой твердой шихте. При этом, однако, шлак получается, хотя и более тугоплавким, чем обычный, но всё же без особых проблем проплавляемым в РТП (в своё время на «Североникеле» РТП работали и на более магнезиальных шлаках – до 25% MgO).

Выход штейна РТП изменяется крайне незначительно: с 24,5 % для руды и окатышей до 24,2 % для брикетов.

Состав и выход конвертерного шлака практически неизменен. В составе файнштейна больший удельный вес будет иметь сульфид меди (его содержание возрастет с 34,5 % до 37,8 %), а металлической меди, напротив, станет несколько меньше (содержание падает с 4,6 % до 4,0 %). Снизится и содержание сульфида никеля (с 52,5 % до 50,0 %). На выходе файнштейна переход на плавку брикетов почти не скажется (его величина падает с 42,2 % для руды и окатышей до 41,5 % для брикетов).

© 2012, Math Designer

Общая масса серы в процессе, как показывает расчет по брикетам состава № 3, при переходе на плавку брикетов возрастет примерно на 2,3 % (учитывая 13 % содержание серы в концентрате). При переходе на плавку брикетов, естественно, следует ожидать увеличения общего количества газов электропечи и содержания в них серы (в данном случае оно возрастает с 3,3 % до 5,4 %). Газы конвертера напротив немного обедняются оксидом серы.

В целом, на конвертерном переделе рассматриваемое изменение состава шихты РТП хотя сказывается и не очень значительно, но в общем в неблагоприятную сторону. Количество штейна в случае брикетов несколько меньше, чем при существующей шихте, и этот штейн более богатый, содержит заметно меньше железа. Следовательно, переход на плавку брикетов не только не повысит тепловые резервы конвертеров, но и приведет к их заметному уменьшению.

При переработке брикетированного концентрата других составов, в частности, № 1 и 2, содержание серы в которых несравнимо выше (24,0 %) масса серы и ее распределение по продуктам плавцеха несомненно изменится, однако общая картина скорее всего не изменится.

Произвести общую оценку технологичности нового процесса можно по величинам передельных и сквозных извлечений цветных металлов. Как можно заметить, при переходе на брикеты извлечения на обеих стадиях переработки возрастают, хотя и не очень значительно.

По причине роста содержаний цветных металлов в файнштейне и увеличения выхода последнего заметно возрастает и сквозное извлечение металлов по цеху. Особенно резкий рост извлечения получается по кобальту; его значение (68,0 %) далеко выходит за привычные рамки. Вместе с тем, при расчете переработки существующей шихты полученное сквозное извлечение кобальта (63,3 %), также является довольно высоким, что, может являться и следствием неточности регрессионных зависимостей по кобальту, заложенных в модель.

© 2012, Math Designer

Анализируя суммарный тепловой эффект реакций при переработке руды и окатышей, который составил $0{,}66 \cdot 10^6$ МДж, а при переработке брикетов - $1{,}13 \cdot 10^6$ МДж, можно сделать вывод о том, что при переходе на плавку брикетов увеличится одна из статей расхода теплового баланса печи – теплота эндотермических реакций, что в свою очередь повлечет за собой увеличение расхода электроэнергии. Однако, это будет слишком поспешный вывод, так как при высоких содержаниях серы в брикетах (составы № 1 и 2) при переходе на новую технологию масса шлака оказывается несравненно меньшей, чем при переработке руды и окатышей, что напрямую влияет на энергозатраты.

Следовательно, в целом удельный расход электроэнергии при переходе на плавку брикетированного концентрата существенно зависит от содержания серы в исходном сырье и при высоких концентрациях серы в брикетах не должен резко изменить удельные энергозатраты.

Добавка кварцевого флюса, вопреки всем ожиданиям, при переработке брикетированного концентрата вовсе не является обязательной (результаты программного расчета для переработки брикетированного концентрата по технологии флюсовой плавки не приводятся). Расчет показывает, что вещественный состав штейна электропечи при переходе на бесфлюсовую плавку практически не меняется; вещественный состав шлака РТП изменяется крайне незначительно (отмечается снижение содержания $SiO_2$ с 37,6 % до 35,85 % и небольшой рост содержаний FeO на 1,5 % и MgO на 0,5 %); изменения в вещественных составах иных продуктов плавцеха не превышает сотых долей процента. Повышение массы оборотного конвертерного шлака крайне низко (менее 1 %). Выход штейна РТП за счет убыли общей массы загрузки при бесфлюсовой электроплавке возрастает с 23,5 % до 24,2 %, что также незначительно. Сквозное извлечение Ni и меди при бесфлюсовой плавке почти не меняется, извлечение кобальта немного падает с 68,0 % до 65,7 % (хотя обе величины невероятно высоки). Изменение энергозатрат (в сторону сокращения) не превышает 0,5 %.

© 2012, Math Designer

Вышесказанное позволяет сделать вывод об отсутствии необходимости в ведении электроплавки брикетированного концентрата по флюсовой схеме.

## 2.2. Влияние изменения состава брикетов на технологические показатели плавцеха

### *2.2.1. Состав исходного сырья*

Изменение состава исходного сырья, переход на плавку брикетированного концентрата, нахождение оптимального состава брикетов безусловно являются важной задачей при проектировании новой технологии. Интерес при этом представляют как расчеты, произведенные на основании реальных составов брикетов (табл. 3), так и выявление частных зависимостей технологических показателей от содержаний отдельных компонентов в брикетах. При решении второй задачи за основу условно был принят среднеарифметический состав брикетированного концентрата (последняя строка табл. 3). Установление частного влияния содержаний отдельных компонентов велось путем изменения их процентного содержания в брикетированном концентрате в файле исходных данных. При этом концентрация не анализируемых компонент оставалась неизменной.

Для проверки реальности принятых составов и выявления возможных диапазонов варьирования отдельных составляющих был предпринят предварительный проверочный расчет вещественных составов для каждого из анализируемых случаев. В результате было установлено, что для условно принятого состава (среднеарифметический состав по данным таблицы 3) возможные диапазоны варьирования компонентов таковы: Ni 5-10 %; Cu 2-9 %; Co 0.1-0.4 %; Fe 23-29 %; S 14-22 %; $SiO_2$ 16-22 %; $Al_2O_3$ 0.5-1.0 %; CaO 0.2-0.7 %; MgO 8-13 %. Вещественные составы брикетов в работе не приводятся.

© 2012, Math Designer

### *2.2.2. Изменение основных технологических показателей*

Изучение влияния состава брикетированного концентрата на показатели технологии плавильного цеха потребовали определенной реконструкции промышленной версии компьютерной программы "Convert v3.exe". В результате была создана лабораторная версия этого приложения "Convert v3 lab.exe. Этот вариант программы позволяет получать интересующие пользователя технологические показатели в виде табличных зависимостей, что существенно сокращает время расчета и облегчает последующую графическую обработку.

Анализ результатов компьютерного расчета по реальным составам брикетов показывает в целом весьма значительные изменения технологических показателей плавцеха. Наибольшему влиянию подвержены составы и массы передельных и конечных продуктов, сквозные и передельные извлечения цветных металлов и затраты энергии на протекание химических реакций.

Настоящая работа рассматривает лишь некоторые технологические показатели работы плавцеха на брикетированном концентрате. Более подробный анализ технологии потребует гораздо больших затрат времени, нежели предоставляется на выполнение настоящей работы и внесения ряда дополнительных изменений в структуру лабораторной версии программы. Поэтому ниже представлены лишь те данные, получение которых имеет наибольший практический интерес.

Таблица 6.

**Содержание цветных металлов и оксида в конвертерном шлаке и оксида магния в шлаке РТП при плавке без конвертерного шлака**

| Состав | Ni | Cu | Co | MgO |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 3,86 | 3,08 | 0,42 | 28,88 |
| 2 | 3,85 | 3,07 | 0,42 | 28,69 |
| 3 | 3,92 | 3,11 | 0,43 | 22,92 |
| 4 | 3,86 | 3,08 | 0,42 | 27,89 |
| 5 | 3,84 | 3,07 | 0,41 | 21,74 |
| 6 | 3,83 | 3,06 | 0,41 | 21,22 |
| 7 | 3,84 | 3,07 | 0,41 | 26,03 |

© 2012, Math Designer

Это замечание касается в частности состава конвертерного шлака (табл. 6), состава шлака электропечи при плавке без оборотного конвертерного шлака, изменения общих масс загрузки электропечи и конвертера, масс получаемых штейна РТП и файнштейна, а также общей массы оборотного конвертерного шлака (табл. 7). Поскольку баланс цветных металлов по переделам может быть вполне однозначно описан величинами передельных и сквозных извлечений, процентные содержания этих компонентов по продуктам плавцеха в работе не приводятся.

В отношении содержания оксида магния в шлаке РТП при плавке без добавления конвертерного шлака (результаты расчета приведены в табл. 6) отметим, что в зависимости от состава брикетов это содержание меняется в широких пределах (от вполне приемлемых 21-23 % до более высоких 28-29 %). Причем, 29 % концентрация MgO характерна именно для состава брикетов, заложенного в разрабатываемую НИИ "Гипроникель" технологию.

Таблица 7.

**Баланс общих масс по переделам**

| **Состав** | **Электроплавка** | | | **Конвертирование** | | | Масса конверт. шлака, т |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Масса штейна, т | Общая масса загрузки, т | Выход штейна, % | Масса файнштейна, т | Общая масса загрузки, т | Выход файн-штейна, % | |
| 1 | 2888,2 | 9064,8 | 31,9 | 1063,8 | 7478,7 | 14,2 | 3042,1 |
| 2 | 2888,6 | 9130,1 | 31,6 | 1036,6 | 7542,2 | 13,7 | 3082,5 |
| 3 | 1717,1 | 7294,8 | 23,5 | 685,0 | 4448,4 | 15,4 | 1844,0 |
| 4 | 2029,3 | 7781,0 | 26,1 | 741,4 | 5364,9 | 13,8 | 2222,6 |
| 5 | 2282,1 | 8224,9 | 27,7 | 800,1 | 6076,0 | 13,2 | 2512,5 |
| 6 | 2500,2 | 8657,3 | 28,9 | 852,1 | 6689,5 | 12,7 | 2758,7 |
| 7 | 2228,6 | 8382,5 | 26,6 | 767,8 | 5982,3 | 12,8 | 2472,3 |

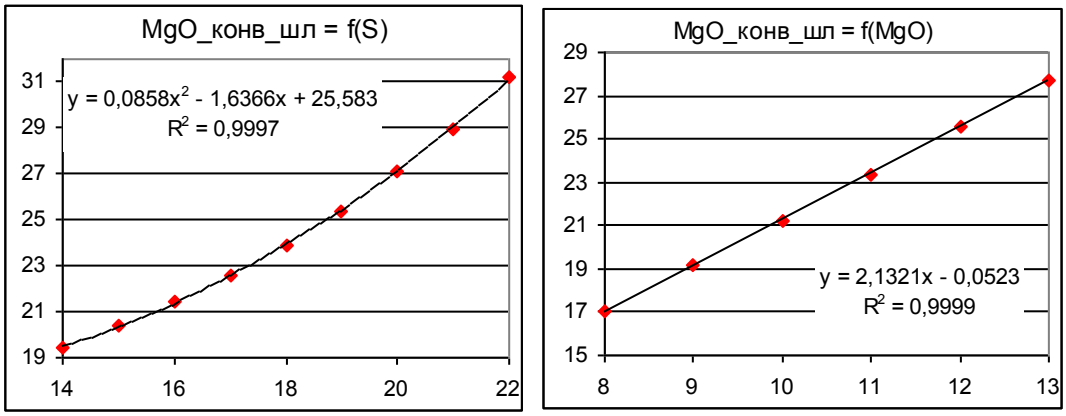
Очевидно, что указанная особенность переработки брикетов из необожженных флотоконцентратов должна учитываться при реализации плавки рассматриваемой шихты. Чтобы не пришлось работать с перегревом шлака, что повлечет за собой повышенный расход электроэнергии, тяжелые условия работы футеровки и других конструктивных элементов печи, ухудшение условий обслуживания печи и другие негативные последствия, нужно не допускать

© 2012, Math Designer

длительной работы печи без заливки конвертерного шлака, а в определенной ситуации, возможно, подшихтовывать в загрузку печи некоторую часть конвертерного шлака в твердом виде.

Попытки выявить зависимость содержания MgO в "собственном шлаке" от состава реальных шлаков результата не дали. Для повышения точности оценки этих зависимостей необходимо провести обособленный анализ для каждого из компонентов брикетов. В результате проведения такового были выявлены только две явные зависимости (рис. 2.1).

Было установлено, что с увеличением содержаний серы и оксида магния в брикетах на 1 % магнезиальность "собственного" шлака электропечи на 2 %. Это означает, что при высоких суммарных содержаниях серы и оксида магния в брикетах будут получаться "собственные" шлаки с неимоверным содержани-




ем MgO (до 35-40 %), представляющие собой, практически, сплошной двухмагниевый силикат (содержание $SiO_2$ 25-28 %). Температура плавления таких шлаков превышает 1700 °С, т.е. проплавить их в электропечи будет практически невозможно.

*а* *б*

Рис. 2.1. Влияние компонентов брикетов на содержание оксида магния в собственном шлаке РТП: *а* – для содержания серы в брикетах; *б* - для содержания оксида магния.

© 2012, Math Designer

Наибольший выход штейна РТП в процентах от общей массы загрузки характерен брикетам с высоким содержанием серы (составы № 1 и 2) (табл. 7). По мере снижения содержания серы в файнштейне выход штейна закономерно возрастает (рис. 2.2).

Рис. 2.2. Зависимость выхода штейна от содержания серы в брикетах.

Аналогичная картина наблюдается и по изменению массы оборотного конвертерного шлака. При увеличении содержания серы с 13 до 24 % его масса возрастает более, чем в 1,5 раза.

По выходу файнштейна в зависимости от состава реальных брикетов явных функций получить не удалось. Прослеживается лишь очень четкая зависимость выхода файнштейна от массы серы в брикетах (рис. 2.3).

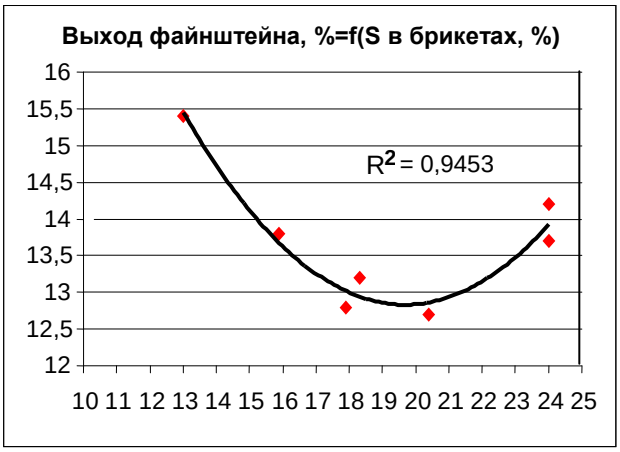



Рис. 2.3. Зависимость выхода файнштейна от содержания серы в брикетах.

Извлечения меди, никеля и кобальта для брикетированного концентрата рассматриваемых составов весьма высоки (сквозные извлечения по никелю составляют 96,6-97,5 %, по меди - 93,8-96,7 %). Обращает на себя внимание

© 2012, Math Designer

величина сквозного извлечения кобальта - на уровне 71,7-75,0 %, что далеко выходит за привычные рамки (Приложение 3).

Особое внимание следует обратить на результаты термодинамического расчета, который показывает, что в зависимости от состава брикетов затраты энергии могут меняться в больших пределах (по составу № 3 величина энергозатрат составила $1{,}13 \cdot 10^6$ МДж, а составу № 1 характерны затраты энергии на уровне $2{,}01 \cdot 10^6$ МДж).

В ходе выявления влияния отдельных составляющих брикетов на технологию плавцеха в общей сложности произведено более 70 программных расчетов, а полученные результаты были подвергнуты графической обработке. С использованием средств приложения "Microsoft Excel" на основании результатов расчетов были выявлены функциональные связи между содержаниями компонентов в брикетах и технологическими показателями плавцеха (ввиду громоздкости не приводятся).

Ввиду трудоемкости указанной работы указанные действия выполнены только для наиболее значимых показателей: извлечений цветных металлов (передельных и сквозных) и результатов термодинамического расчета.

Установлено, что на сквозное извлечение никеля наибольшее влияние оказывает содержание в брикетах Ni, S, $SiO_2$ (особенно при бесфлюсовой плавке); сквозное извлечение меди - Ni, Cu; сквозное извлечение кобальта - Ni, Cu, Co, S, $SiO_2$, MgO (Приложение 2). Причем наибольшее влияние со стороны состава брикетов испытывает извлечение кобальта, меняющееся в пределах от 55 до 80 %. Следует обратить внимание на тот факт, что за счет увеличения содержания оного только оксида кремния с 16 до 22 % извлечение кобальта возрастает примерно на 10 % (с 66,3 % до 76,5 %), а при флюсовой плавке - на 4 % (с 71,5 % до 75,5 %). На сквозных извлечениях никеля и меди добавка флюса заметно не отражается.

Перед тем, как сделать окончательный вывод о целесообразности введения электроплавки по флюсовой схеме, был проведен сопоставительный ана-

лиз. Для этого были использованы возможности математического пакета "MathCad" [5, 7]. Основным элементом этого решения являются зависимости извлечений цветных металлов при флюсовой и бесфлюсовой плавках от содержания оксида кремния. На рис. 2.4 приведены зависимости, на которых четко прослеживается рост извлечения кобальта при электроплавке с добавкой флюса. Несколько меньший рост извлечения наблюдается при этом на конвертерном переделе. В целом же можно сделать вывод: положительный эффект от введения флюса достигается лишь при низких содержаниях кремнезема в исходных брикетах. При концентрации $SiO_2$ в брикетах более 20 % флюсовая плавка с точки зрения извлечений нецелесообразна. Аналогичный результат дает и сопоставление величин энергозатрат (Приложение 3). Для брикетов с содержанием $SiO_2$ менее 21 % величина энергозатрат на обеспечение успешного протекания реакций в ванне электропечи при бесфлюсовой плавке на 1,5 % ниже, чем при введении флюса (рис. 2.4).

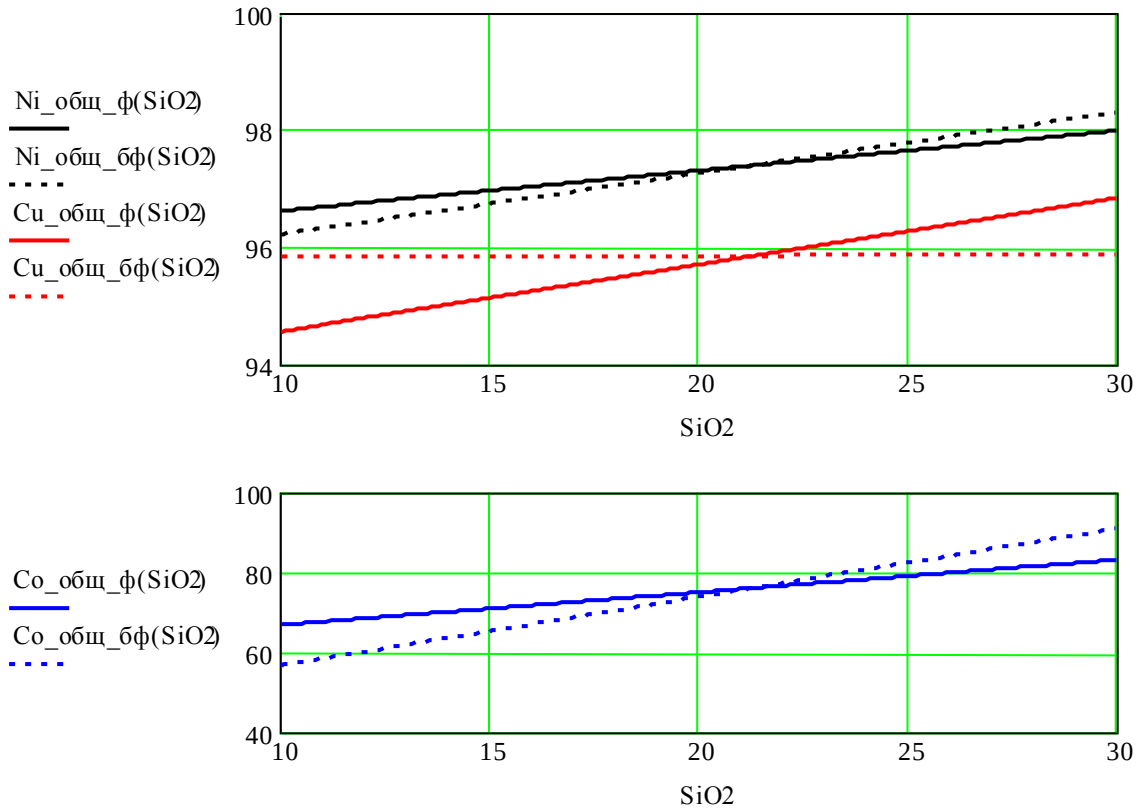



Рис. 2.4. Зависимость сквозных извлечений цветных металлов от содержания кремнезема в условиях флюсовой и бесфлюсовой плавок.

© 2012, Math Designer

В целом можно заметить, что затраты энергии возрастают с ростом содержаний никеля, меди и железа в брикетах, причем их изменение существенно: при изменении концентрации никеля с 5 до 10 % их относительное увеличение составляет 34,6 %; при изменении концентрации меди с 2 до 9 % энергозатраты увеличиваются на 34,8 %; при изменении концентрации железа с 23 до 29 % рост затрат энергии составит около 7 %. Исключением, пожалуй, является медь, повышенное содержание которой весьма незначительно (на 1-1,5 %) снижает расход энергии на реакции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения работы создана компьютерная программа сквозного расчета технологии плавильного цеха ГМК «Печенганикель» (листинг занимает более 120 страниц печатного текста). В окончательной версии пользовательской программы реализован альтернативный ввод данных из файла и с клавиатуры, осуществлен вывод результатов технологического расчета: массовых и вещественных составов всех продуктов и материальных балансов по переделам и цеху в целом, передельных и сквозных извлечений цветных металлов, баланс серы в процессе, сводные таблицы материальных балансов для электроплавки, конвертирования и сквозной материальный баланс, вывод таблицы термодинамических показателей, состава шлака электропечи при плавке без оборотного конвертерного шлака.

Создана лабораторная версия программы технологии плавцеха, дающая возможность получать интересующие пользователя технологические показатели в виде табличных зависимостей, что существенно сокращает время расчета и облегчает последующую графоаналитическую обработку.

Выполнен всесторонний анализ изменения технологических показателей плавцеха при переходе на новый вид сырья - брикетированный концентрат. Показано, что переход на плавку брикетов с иным химико-минералогическим

составом, чем у перерабатываемой на предприятии в настоящее время смеси руды и окатышей приведет к существенным изменениям технологии. Более высокое содержание сульфидов $NiFeS_2$, $CuFeS_2$, и талька в брикетированном концентрате и меньшее, чем в собственной руде, оксидов железа и кремния приведет к заметному изменению состава шлаков. Недостаток оксидного железа и кремнезема сказывается на процессе электроплавки, повышая магнезиальность шлака РТП и увеличивая температуру его плавления. В зависимости от состава брикетов содержание MgO в "собственном" шлаке меняется в широких пределах (от вполне приемлемых 21-23 % до более высоких 28-29 %).

Это предположение проверено на брикетах различного состава, что позволило установить главные факторы, влияющие на содержание MgO в «собственном» шлаке РТП: концентрация серы и оксида магния в исходных брикетах. В связи с чем не рекомендуется плавить брикеты с содержаниями серы более 17 % и оксида магния более 10,5 % без заливки жидкого конвертерного шлака.

Установлено, что при содержании кремнезема в брикетах менее 20-22 % процесс электроплавки можно будет особых сложностей вести по бесфлюсовой схеме, если при этом будет обеспечено постоянное присутствие конвертерного шлака в ванне электропечи. На сквозных извлечениях цветных металлов это практически не скажется.

Количество получаемого электропечного штейна в случае брикетов несколько меньше, чем при существующей шихте и этот штейн более богатый, содержит заметно меньше железа, откуда следует, что вопреки ожиданиям, переход на плавку брикетов не только не повысит тепловые резервы конвертеров, но и приведет к их заметному уменьшению.

В остальном на переделе конвертированием изменение состава сырья скажется незначительно. Состав и выход конвертерного шлака при изменении сырья останется практически неизменным. На выходе файнштейна переход на плавку брикетов почти не скажется (его величина падает с 42,2 % для руды и

© 2012, Math Designer

окатышей до 41,5 % для брикетов). В составе файнштейна больший удельный вес будет иметь сульфид меди, а металлической меди, напротив, станет меньше. Снизится и содержание сульфида никеля.

Установлено, что на сквозное извлечение никеля наибольшее влияние оказывает содержание в брикетах Ni, S, $SiO_2$ (особенно при бесфлюсовой плавке); сквозное извлечение меди - Ni, Cu; сквозное извлечение кобальта - Ni, Cu, Co, S, $SiO_2$, MgO. Извлечения меди, никеля и кобальта для брикетированного концентрата рассматренных в работе составов весьма высоки (сквозные извлечения по никелю составляет 96,6-97,5 %, по меди - 93,8-96,7 %). Обращает на себя внимание величина сквозного извлечения кобальта - на уровне 71,7-75,0 %, что далеко выходит за привычные рамки.

Суммарный тепловой эффект реакций при переработке руды и окатышей, составивший $0{,}66 \cdot 10^6$ МДж, а при переработке брикетов – $1{,}13 \cdot 10^6$ МДж для анализируемых составов при заметном (на 14 %) снижении массы образующегося шлака, а при плавке брикетов с большим содержанием серы (составы № 1 и 2) выход шлака еще уменьшится, свидетельствует о наличии некоторого увеличения расхода электроэнергии при переходе на плавку брикетов, но в целом этот рост, как ожидается, не будет чрезмерно большим.

Переход на плавку нового вида сырья (брикетов) позволит не только сократить выбросы сернистого газа, но и получить годовой экономический эффект в размере около 173 тыс. рублей [13].

На основании изложенных выше результатов комбинату «Печенганикель» были даны соответствующие рекомендации по осуществлению технологии электроплавки и конвертирования на новом виде исходного сырья.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Ванюков А.В., Зайцев Ю.Я.** Шлаки и штейны цветной металлургии. М.: Металлургия, 1965. -406 с.
2. **Гальнбек А.А., Шалыгин Л.М., Шмонин Ю.Б.** Расчеты пирометаллургических процессов и аппаратов цветной металлургии. – Челябинск: Металлургия, 1990. –


© 2012, Math Designer

448 с.
3. **Диомидовский Д.А.** Печи цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1963. – 460 с.
4. **Диомидовский Д.А., Шалыгин Л.М., Гальнбек А.А., Южанинов И.А.** Расчеты процессов и печей цветной металлургии. – М.: Металлургия, 1963. – 400 с.
5. **Дьяконов В.** Mathcad 2001: учебный курс. – СПб.: Питер, 2001. -624 с.
6. **Кубашевский О., Ококк С. Б.** Металлургическая термохимия. Пер. с анг. М.: Металлургия, 1982.-392 с.
7. **Кудрявцев Е. М.** Mathcad 2000 Pro. Символьное и численное решение разнообразных задач. М.: ДМК Пресс, 2001.-576 с.
8. **Мечёв В.В.** Конвертирование никельсодержащих медных штейнов. М.: Металлургия, 1973. 183 с.
9. **Серебряный Я. Л.** Электроплавка медно-никелевых руд и концентратов: Учебник. - М.: Металлургия, 1974. -248 с.
10. Технологическая инструкция передела конвертирования медно-никелевого штейна. Никель: ГМК «Печенганикель», 1992. 135 с.
11. Технологическая инструкция по переработке никельсодержащего сырья в руднотермических электропечах. Никель: ОАО «Кольская ГМК», 1999. 176 с.
12. Турбо Паскаль 7.0 – К.: Изд. группа BHV, 1999. –448 с.
13. Реконструкция цеха обжига флотоконцентратов ОФ для производства упрочненных брикетов Том 1. Рабочий проект – Санкт – Петербург: АО «Институт Гипроникель», 2000 – 93 с.
14. **Фаронов В.В.** Турбо Паскаль 7.0. Практика программирования. Учебное пособие. – М.: «Нолидж», 1999. –432 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ