

Омск ⁶
A-25

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ
СТАЛИ И СПЛАВОВ

На правах рукописи

Асп. В.М.Ташевская

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗГОНКИ МЕТАЛЛОВ
ИЗ ЖИДКИХ ШЛАКОВ МОДЕЛИРОВАНИЕМ В ЦЕЛЯХ ЕГО ОПТИМИЗАЦИИ
И АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
(На примере фьюминг-процесса)

Автореферат

диссертации, представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научные руководители:

профессор доктор технических наук Д.И.Лисовский
профессор доктор технических наук С.В.Емельянов

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ
СТАЛИ И СПЛАВОВ

На правах рукописи

Асп. В.М.Ташевская

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗГОНКИ МЕТАЛЛОВ
ИЗ ЖИДКИХ ШЛАКОВ МОДЕЛИРОВАНИЕМ В ЦЕЛЯХ ЕГО ОПТИМИЗАЦИИ
И АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
(На примере фьюминг-процесса)

Автореферат

диссертации, представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научные руководители:

профессор доктор технических наук Д.И.Лисовский
профессор доктор технических наук С.В.Емельянов

В связи с существующей заинтересованностью промышленности в увеличении выпуска цветных и редких металлов, возникает вопрос о сокращении металлических потерь при переработке металлосодержащего сырья за счет мобилизации внутренних резервов производства.

В последние годы все большее внимание уделяется широкому внедрению процессов, используемых для извлечения ценных компонентов из отходов металлургического производства, например, из отвальных шлаков, являющихся при современном развитии техники дополнительной сырьевой базой для получения целого ряда ценных элементов

Среди подобных процессов цветной металлургии особое место занимает фьюминг-процесс. В основном, он применяется для переработки отходов металлургического производства, которые содержат такие необходимые народному хозяйству металлы, как цинк, свинец, олово, селен, теллур, германий и др. Фьюминг-процесс обладает большими потенциальными возможностями высокоэффективного извлечения этих металлов.

Запроектировано широкое внедрение процесса фьюмингования в отечественную металлургию, что выдвинуло ряд технических проблем, решение которых должно ускорить практическое применение этого перспективного метода.

Одной из причин, препятствующих использованию фьюмингования, является сложность управления процессом. Затруднения в управлении объясняются специфическими особенностями процесса, заключающимися в сложной физико-химической структуре и необходимости непрерывного поиска оптимальных условий сжигания топлива. Параметры технологического режима не стабилизированы, их

характеристики изменяются в течение процесса под влиянием различных факторов внешнего и внутреннего характера, являющихся случайными функциями времени. Кроме того, управление усложняют и технические трудности, связанные с получением необходимой информации об объекте управления, и ряд других причин. Процесс не имеет системы автоматического управления, а ошибки, которые неизбежны при ручном управлении процессом, ведут к перерасходу дорогостоящей угольной пыли, снижению производительности и увеличению себестоимости получаемых металлов.

К недостаткам фьюмингования относится также то, что процесс протекает в аппарате периодического действия. Вопрос перевода процесса на схему непрерывного действия на отечественных заводах находится в стадии исследований и проектных разработок.

Исходя из вышесказанного, были сформулированы основные задачи, решение которых будет способствовать выполнению проблемы автоматического управления фьюминг-процессом:

1. Поиск оптимальных условий протекания процесса фьюмингования.
2. Установление алгоритма оптимального управления фьюминг-процессом.
3. Рекомендации по созданию системы автоматического управления фьюминг-процессом.

Решение поставленных задач осуществлялось моделированием с использованием математических методов и вычислительной техники. Применение методов математического моделирования связано с целым рядом преимуществ данных методов перед физическим экспериментом на промышленной установке.

Одним из основных этапов работы явился синтез математической модели фьюминг процесса, в основу которой были заложены уравнения, описывающие наиболее существенные свойства процесса.

В настоящее время на отечественных установках и на большинстве зарубежных фьюмингование осуществляется периодически с продувкой ванны шлакового расплава углеродистой смесью. Поэтому была исследована и оптимизирована модель периодического процесса фьюмингования.

Метод оптимизации и результаты, полученные в работе, можно распространить на весь класс подобных восстановительных процессов, которые протекают в расплавах с продувкой (например, конвертерные процессы, плавка концентратов в жидкой ванне и др.).

В первой главе, отражающей современное состояние технологии и автоматизации фьюминг-процесса дан краткий анализ большого количества существующих экспериментальных и исследовательских работ, посвященных изучению кинетических закономерностей процесса, внутреннего механизма его протекания, путей интенсификации, оптимизации и автоматизации фьюмингования. Изучены также работы по теоретическим основам восстановительных процессов подобного типа. Приведен обзор литературы по вопросам математического моделирования термодинамических гетерогенных процессов металлургической и химической промышленности.

Проведенный анализ литературных данных выявил круг нерешенных вопросов. Процесс еще недостаточно изучен. Нет единого мнения по поводу кинетики и механизма протекания основных восстановительных реакций. Не установлено, что является непосредственным восстановителем железа: твердый углерод, его окись или за-

лиз железа. Процесс не автоматизирован и не исследован как объект автоматического управления. Нет стройного математического описания фьюминг-процесса, отражающего основные закономерности его протекания. Динамика процесса изучена недостаточно. Математическая модель процесса, отражающая динамику фьюмингования, не создана. Не найдено оптимальных условий протекания процесса. Автоматизация отдельных узлов не выполняет задачу оптимального управления процессом. Не сформулирован критерий оптимальности для данного процесса и не выбран закон автоматического управления.

Решение поставленных технологических задач может быть успешно осуществлено с помощью математической модели процесса.

Вторая глава: "Некоторые вопросы исследования фьюминг-процесса как объекта автоматического управления" посвящена синтезу математической модели фьюмингования. Кратко дан общий подход к построению математической модели и получена модель процесса фьюмингования в общем виде.

Наиболее часто фьюмингованием перерабатываются шлаки с целью получения цинка, и технологических данных по восстановлению этого металла сравнительно больше, чем по другим металлам, получаемым фьюмингованием; это облегчает дальнейшую проверку созданной модели. Поэтому для построения математической модели фьюминг-процесса был взят пример восстановления цинка.

Так как среди исследователей существуют различные взгляды на внутренний механизм протекания процесса, то при синтезе математической модели подробно рассмотрена и математически описана каждая схема возможного механизма.

Уравнения, описывающие процесс, достаточно сложны, и их решение можно получить лишь с помощью вычислительных машин. Но и в этом случае, чтобы хватило мощности одной электронной машины для набора уравнений процесса, требуется известная идеализация последнего в пределах точности, не допускающих нарушения основных закономерностей процесса.

При построении модели процесс был идеализирован на основании следующих допущений:

Перемешивание шлаковой ванны в процессе фьюмингования настолько интенсивно, что градиент концентрации в расплаве отсутствует; процесс однороден во всем пространстве аппарата и температура одинакова во всех точках шлакового расплава.

Так как в процессе продувки шлака транспорт веществ, образующихся в результате химических реакций, происходит с достаточно высокой скоростью, полагаем, что продукты химического взаимодействия мгновенно покидают зону реакции. Следовательно, реакции восстановления окислов металлов протекают только в прямом направлении и скорость их не зависит от парциального давления продуктов реакции.

Считаем, что скорость процесса фьюмингования лимитируется скоростью химической реакции восстановления металла, так как скорости диффузии адсорбции и десорбции при турбулентном режиме ванны и непрерывно обновляющейся межфазной поверхности не-соизмеримо велики по сравнению с последней.

В связи с высокой энергией активации и другими факторами, отмеченными в гл. I, рассматриваем протекание процесса в кинетической области.

Считаем, в первом приближении, что количества веществ, покидающих аппарат, пропорциональны их количествам в реакционной зоне.

Полагаем, что восстанавливаемые металлы присутствуют в ванне шлака в виде окислов.

Давление воздуха, поступающего в печь, принимаем постоянным.

В связи с тем, что температура воды, охлаждающей кессоны, в течение процесса изменяется незначительно (в пределах 13°C) принимаем ее равной температуре наружных стенок аппарата, при этом эффект передачи тепла от стенок аппарата к воде не учитывается.

Считаем, что теплоемкости, входящие в уравнения, не зависят от температуры.

Если восстановителем является преимущественно окись углерода, математическая модель фьюминг-процесса включает следующие дифференциальные уравнения:

$$\frac{d G_{ZnO}}{d \tau} = -K_1 G_{ZnO} C_{CO} - K_2 G_{ZnO} C_{Fe}$$

$$\frac{d G_{FeO}}{d \tau} = \psi K_2 G_{ZnO} C_{Fe} - K_3 G_{FeO} C_{CO} - \lambda G_{FeO}$$

$$V \frac{d C_{Fe}}{d \tau} = \nu K_3 G_{FeO} C_{CO} - \omega K_2 G_{ZnO} C_{Fe} - j V C_{Fe}$$

$$\frac{d G_c}{d \tau} = f F_y - K_4 G_c C_{O_2} - K_5 G_c C_{O_2} - K_6 G_c C_{CO_2} - z G_c$$

$$V \frac{d C_{CO}}{d \tau} = K_5 \beta G_c C_{O_2} + 2 K_6 G_c C_{CO_2} - K_1 h_1 G_{ZnO} C_{CO} - K_3 h_2 G_{FeO} C_{CO} - K_7 V C_{CO} C_{O_2} - V \ell C_{CO}$$

$$V \frac{d C_{O_2}}{d \tau} = m F_g - i K_4 G_c C_{O_2} - 0,5 K_5 G_c C_{O_2} - 0,5 K_7 V C_{CO} C_{O_2} - g V C_{O_2}$$

$$V \frac{d C_{CO_2}}{d \tau} = K_4 \alpha G_c C_{O_2} + K_7 V \rho C_{CO} C_{O_2} + K_1 \delta G_{ZnO} C_{CO} + K_3 \varepsilon G_{FeO} C_{CO} - K_6 \gamma G_c C_{CO_2} + (\sigma - e) V C_{CO_2}$$

$$\frac{d \ell_r}{d \tau} = \frac{\lambda_r}{\gamma_r \ell_r L} (t_r - t_{cr}) - \frac{\alpha_r}{\gamma_r L} (t - t_r)$$

$$G_c^p \frac{d t}{d \tau} = \eta q_n^p F_y + C_g^p t_g F_g - q_1 K_1 G_{ZnO} C_{CO} - q_3 K_3 G_{FeO} C_{CO} - q_2 K_2 G_{ZnO} C_{Fe} - 0,0795 Z^b C_r^p \frac{F_g}{F_y} t - F \gamma L \frac{d \ell_r}{d \tau} - \xi t$$

Причем

$$G_{ZnO}(0) = \alpha \Phi_{ш}; \quad t(0) = t_0$$

$$G_{FeO}(0) = \beta \Phi_{ш}; \quad K_i = f_i(t) = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right); \quad \text{где } i = 1, 2, \dots, n$$

где G_{ZnO} , G_{FeO} — соответственно весовые количества окиси цинка и закиси железа в шлаке;

$G_{ZnO}(0)$, $G_{FeO}(0)$ — начальные содержания окиси цинка и закиси железа в шлаке;

K_i — кажущаяся константа скорости i -той химической реакции процесса фьюмингования;

C_{CO} — массовая концентрация окиси углерода;

G_c — весовое количество углерода, участвующее в процессе;

C_{Fe} — массовая концентрация железа;

C_{CO_2} — массовая концентрация двуокиси углерода;

C_{O_2} — массовая концентрация кислорода;

ℓ_r — толщина гарниссажного слоя;

t — температура процесса;

$t(0)$ — начальная температура шлака;

F_y — поток угольной пыли;

F_g — расход дутья;

t_r — температура гарниссажа;

- $t_{ст}$ - температура стенок печи;
 C^P - удельная теплоемкость шлакового расплава;
 G - вес шлаковой ванны;
 C_g^P - теплоемкость воздуха при температуре t_g ;
 C_r^P - теплоемкость отходящих газов при температуре процесса;
 m - коэффициент, учитывающий степень обогащения дутья кислородом;
 Q_H^P - теплотворная способность топлива;
 η - коэффициент, отражающий степень использования топлива;
 q_{Vi} - тепловые эффекты химических реакций;
 R - универсальная газовая постоянная;
 A_i - предэкспоненциальный множитель;
 T - абсолютная температура;
 E_i - энергия активации химических реакций;
 Z^0 - теоретическое количество воздуха, необходимое для полного сжигания топлива;
 γ_r - удельный вес шлака, образующего гарниссаж;
 L - скрытая теплота плавления;
 F - внутренняя поверхность гарниссажа;
 λ_r - коэффициент теплопроводности;
 α_r - коэффициент теплопередачи;
 $\Phi_{ш}$ - количество шлака, загружаемого в печь;
 ξ - коэффициент, отражающий тепловые потери;
 λ - коэффициент, отражающий потери закиси железа;

- V - объем шлаковой ванны;
 j - коэффициент потерь металлического железа;
 ζ - коэффициент, отражающий потери твердого углерода;
 ℓ - коэффициент потерь окиси углерода;
 b, e - коэффициенты, отражающие приход и потери двуокиси углерода в результате побочных химических реакций;
 g - коэффициент, отражающий потери кислорода;
 $i, \psi, \nu, \omega, \beta, h_1, h_2, \vartheta, \rho, \delta, \varepsilon, \gamma, f$ - стехиометрические коэффициенты;
 f - коэффициент, отражающий содержание углерода в топливе.

На основании сделанного математического описания предложена структурная схема математической модели фьюминг-процесса.

Математическая модель для случая восстановления металла твердым углеродом отличается от первого варианта тем, что кислород, поступающий в процесс, расходуется, в основном, не на горение топлива, а на образование магнетита Fe_3O_4 . Ассимиляция кислорода шлаком происходит намного быстрее, чем процесс горения углерода. Восстановление металла происходит на поверхности частицы углерода через газовую фазу. Математическое описание по данному предполагаемому механизму процесса имеет вид следующей системы уравнений:

$$\frac{dG_{ZnO}}{d\tau} = -K_1 G_{ZnO} C_{CO} - K_2 G_{ZnO} C_{Fe}$$

$$\frac{dG_{FeO}}{d\tau} = \psi K_2 G_{ZnO} C_{Fe} + 3K_8 G_{Fe_3O_4} C_{CO} - K_3 G_{FeO} C_{CO} - 6K_9 G_{FeO} C_{O_2} - \lambda G_{FeO}$$

$$V \frac{dC_{Fe}}{d\tau} = K_3 \psi G_{FeO} C_{CO} - K_2 \omega G_{ZnO} C_{Fe} - j V C_{Fe}$$

$$\frac{dG_{Fe_3O_4}}{d\tau} = 2K_9 G_{FeO} C_{O_2} - K_8 G_{Fe_3O_4} C_{CO}$$

$$\frac{dG_C}{d\tau} = f F_y - K_4 G_C C_{O_2} - K_6 G_C C_{CO_2} - \tau G_C$$

$$V \frac{dC_{CO}}{d\tau} = 2K_6 G_C C_{CO_2} - K_1 h_1 G_{ZnO} C_{CO} - K_3 h_2 G_{FeO} C_{CO} - K_8 \theta G_{Fe_3O_4} C_{CO} - V \ell C_{CO}$$

$$V \frac{dC_{CO_2}}{d\tau} = K_4 \partial G_C C_{O_2} + K_8 \chi G_{Fe_3O_4} C_{CO} + K_1 \delta G_{ZnO} C_{CO} + K_3 \varepsilon G_{FeO} C_{CO} - K_6 \gamma G_C C_{CO_2} + (\sigma - e) V C_{CO_2}$$

$$V \frac{dC_{O_2}}{d\tau} = m F_g - i K_4 G_C C_{O_2} - K_9 S G_{FeO} C_{O_2} - g V C_{O_2}$$

$$\frac{d\ell_r}{d\tau} = \frac{\lambda_r}{\gamma_r L \ell_r} (t_r - t_{cr}) - \frac{\alpha_r}{\gamma_r L} (t - t_r)$$

$$G C^P \frac{dt}{d\tau} = \eta Q_H^P F_y + C_g^P t_g F_g - q_1 K_1 G_{ZnO} C_{CO} - q_2 K_2 G_{ZnO} C_{Fe} - q_3 K_3 G_{FeO} C_{CO} - q_8 K_8 G_{Fe_3O_4} C_{CO} + q_9 V K_9 G_{FeO} C_{O_2} - F \gamma_r L \frac{d\ell_r}{d\tau} - 0,0795 Z^B C_r^P \frac{F_g}{F_y} - \xi t$$

$$G_{ZnO}(0) = a \Phi_{\omega}$$

$$G_{FeO}(0) = b \Phi_{\omega}$$

$$t(0) = t_0$$

$$K_i = f_i(t) = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

где θ, χ, δ - стехиометрические коэффициенты;

$G_{Fe_3O_4}$ - количество магнетита в шлаке.

Рассмотрен механизм протекания фьюминг-процесса, предполагающий, что непосредственным восстановителем металла служит закись железа. В основу математической модели, отражающей данный механизм, заложена следующая система дифференциальных уравнений:

$$\frac{dG_{ZnO}}{d\tau} = -K'_1 G_{ZnO} C_{FeO}$$

$$V \frac{dC_{FeO}}{d\tau} = 3K_8 G_{Fe_3O_4} C_{CO} - 3K'_1 G_{ZnO} C_{FeO} - 2K'_2 V C_{FeO} C_{CO_2} - 6K_9 V C_{FeO} C_{O_2} - \lambda V C_{FeO}$$

$$\frac{dG_{Fe_3O_4}}{d\tau} = K'_1 \omega G_{ZnO} C_{FeO} + K'_2 V C_{FeO} C_{CO_2} + 2K_9 G_{FeO} C_{O_2} - K_8 G_{Fe_3O_4} C_{CO}$$

$$\frac{dG_C}{d\tau} = f F_y - K_4 G_C C_{O_2} - \tau G_C$$

$$V \frac{dC_{CO}}{d\tau} = V K'_2 \gamma G_{FeO} C_{CO_2} - K_8 \theta G_{Fe_3O_4} C_{CO} - V \ell C_{CO}$$

$$V \frac{dC_{CO_2}}{d\tau} = K_4 \partial G_C C_{O_2} + K_8 \chi G_{Fe_3O_4} C_{CO} - V K'_2 \eta G_{FeO} C_{O_2} - e V C_{CO_2}$$

$$V \frac{dC_{O_2}}{d\tau} = m F_g - i K_4 G_C C_{O_2} - K_9 S V C_{FeO} C_{O_2} - g V C_{O_2}$$

$$\frac{d\ell_r}{d\tau} = \frac{\lambda_r}{\gamma_r L \ell_r} (t_r - t_{cr}) - \frac{\alpha_r}{\gamma_r L} (t - t_r)$$

$$G C^P \frac{dt}{d\tau} = \eta Q_H^P F_y + C_g^P t_g F_g - q'_1 K'_1 G_{ZnO} C_{FeO} - q'_8 K_8 G_{Fe_3O_4} C_{CO} + q'_2 K'_2 V C_{FeO} C_{CO_2} + q_9 V K_9 G_{FeO} C_{O_2} - 0,0795 Z^B C_r^P \frac{F_g}{F_y} - F \gamma_r L \frac{d\ell_r}{d\tau} - \xi t$$

Причем

$$\begin{aligned}G_{ZnO}(0) &= a \Phi_{ш} \\ G_{FeO}(0) &= b' \Phi_{ш} \\ t(0) &= t_0 \\ K_i = f_i(t) &= A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right)\end{aligned}$$

где ω, γ, η' — стехиометрические коэффициенты.

Составлена структурная схема математической модели для случая восстановления металла закисью железа.

Каждый из рассмотренных случаев возможного механизма процесса фьюмингования указывает на то, что процесс описывается системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений n -го порядка. Нелинейности выражены произведениями переменных и экспоненциальными функциями макроскопических констант скоростей термохимических реакций.

Моделирование каждой из составленных схем представляет практический интерес для изучения внутреннего механизма процесса. В данной работе была поставлена задача изучения процесса как объекта автоматического управления. Для этой цели каждая из разработанных схем не годится, поскольку приводит к излишней громоздкости математической модели. Поэтому на базе рассмотренных схем был произведен синтез аппроксимированной модели фьюминг-процесса, в которую вошли основные принципы, заложенные в процесс, общие для всех трех полученных математических моделей.

Аппроксимированная математическая модель основана на ряде допущений, вытекающих из анализа вышеописанных схем. Считаем, что основной приток тепла в процесс происходит за счет горения

углерода до CO_2 . Тогда оставшая часть углерода выполняет функции восстановителя металла. При этом углерод либо предварительно сгорает до окиси, либо непосредственно восстанавливает металл, либо служит косвенным восстановителем через ряд промежуточных реакций. Влияние на процесс промежуточных реакций в модели учитывается соответствующими коэффициентами. В связи с тем, что постоянная времени горения углерода, несоизмеримо мала по сравнению с постоянной времени восстановления металла, лимитирующего процесс в целом, то динамика реакций горения углерода в аппроксимированной модели не рассматривается. Потери тепла приняты пропорциональными температуре шлаковой ванны.

В структурную схему аппроксимированной математической модели фьюминг-процесса заложена следующая система нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{d\tau} &= -kxy \\ \frac{dy}{d\tau} &= af(\tau) - bM(\tau) - kxy - hy \\ \frac{dt}{d\tau} &= \gamma_1 M(\tau) - \lambda f(\tau) - \theta kxy - \gamma_2 M(\tau) - \xi t\end{aligned}$$

Причем

$$x(0) = x_0; \quad t(0) = t_0; \quad K = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

где x — массовая концентрация цинка в шлаке;
 y — концентрация восстановителя в зоне реакции;
 $t(0)$ — начальная температура шлака;
 $\alpha, \beta, \gamma, h, \gamma_1, \gamma_2, \lambda, \xi, \theta$ — постоянные коэффициенты, зависящие от выбора технологического режима.

В настоящее время фьюминг процесс осуществляется в аппаратах периодического действия, но ведутся исследования в опытно-промышленном масштабе по переводу процесса на непрерывную схему. Причем, в качестве топлива предполагается использовать природный газ. Поэтому была создана математическая модель непрерывного процесса фьюмингования, в которой функцию топлива выполнял природный газ.

При осуществлении непрерывной схемы фьюмингования технологическая цепочка состоит из трех последовательно расположенных аппаратов. Шлак, непрерывно загружаемый в первый аппарат, перетекает во второй, а затем в третий. В каждом аппарате шлаковый расплав продувается газом, уголь в виде кусков определенного размера загружается сверху. Проблема оптимизации данной технологической схемы заключается в определении оптимального режима для каждого аппарата.

В связи с актуальностью возникшей проблемы была разработана аппроксимированная математическая модель непрерывного процесса фьюмингования. Схема модели в настоящее время не могла быть уточнена, так как еще нет соответствующих динамических данных промышленных или полупромышленных испытаний непрерывного процесса. Однако, она позволила установить основные взаимосвязи параметров в непрерывном процессе.

При создании математической модели были приняты следующие допущения. Твердые частицы угля имеют сферическую форму, которая сохраняется во время химических реакций. Активная поверхность твердой частицы однородна. В химической реакции участвуют только те молекулы двуокиси углерода, которые активированно адсорбированы на поверхности взаимодействия, и адсорбция газообразных

молекул CO_2 не сопровождается их диссоциацией. Адсорбированный слой мономолекулярен. Адсорбированные молекулы не взаимодействуют друг с другом. Количества веществ, покидающих аппарат, пропорциональны их количествам в аппарате. Температура во всех точках шлакового расплава одинакова. Считаем реакции взаимодействия кислорода с углеродом побочными (кислород с газом попадает в аппарат в небольших количества) и динамику этих реакций не рассматриваем.

Непрерывный процесс фьюмингования описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{d\theta_{\text{CO}_2}}{d\tau} = K_a C_{\text{CO}_2} \theta_0 - K_p \theta_{\text{CO}_2}$$

$$\frac{d\theta_{\text{CO}}}{d\tau} = 2K_p \theta_{\text{CO}_2} - K_g' \theta_{\text{CO}}$$

$$\theta_{\text{CO}_2} + \theta_{\text{CO}} + \theta_0 = 1$$

$$V \frac{dC_{\text{CO}}}{d\tau} = K_6 g G_c C_{\text{CO}_2} - K_1 h_1 G_{\text{ZnO}} C_{\text{CO}} - V \ell C_{\text{CO}}$$

$$V \frac{dC_{\text{CO}_2}}{d\tau} = k_r' F_{r_j} - \gamma K_6 G_c C_{\text{CO}_2} - V k_r'' C_{\text{CO}_2} - \delta' K_1 G_{\text{ZnO}} C_{\text{CO}}$$

$$\frac{dG_c}{d\tau} = f F_{y_j} - K_6 G_c C_{\text{CO}_2} - \tau G_c$$

$$\frac{dG_{\text{ZnO}}}{d\tau} = \beta_1 \Phi_{\text{ш}} - K_1 G_{\text{ZnO}} C_{\text{CO}} - \beta_2 G_{\text{ZnO}}$$

$$G_c^p \frac{dt}{d\tau} = C_g^p t g F_{g_j} + q_6 G_c C_{\text{CO}_2} - q_1 G_{\text{ZnO}} C_{\text{CO}} + C_{\text{ш}}^p t_{\text{ш}} \Phi_{\text{ш}} - S_r(\tau) t - \xi t$$

Причем $K_p = A_p e^{-\frac{E_p}{RT}}$; $K_a = A_a e^{-\frac{E_a}{RT}}$; $K_g' = A_g e^{-\frac{E_g}{RT}}$

Причем

$$K_i = f_i(t) = A_i e^{-\frac{E_i}{RT}}$$
$$i = 1, 2, \dots, n$$

где

где A_p, A_a, A_g, A_i — предэкспоненциальные факторы;

θ_{CO_2} — общая степень заполнения поверхности частиц двуокисью углерода;

θ_{CO}, θ_0 — соответственно степень заполнения поверхности окисью углерода и доля свободной поверхности частиц;

K_a, K_g' — соответственно константы скорости адсорбции и десорбции

K_r' — коэффициент, отражающий содержание CO_2 в дутье

F_{rj} — весовой поток дутья j -го каскада;

K_r'' — коэффициент пропорциональности;

θ_1, θ_2 — коэффициенты, отражающие соответственно поступление и уход окиси цинка со шлаком.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям математической модели фьюминг-процесса с помощью аналоговых вычислительных машин. Аппроксимированная математическая модель периодического процесса фьюмингования набиралась на электронной аналоговой вычислительной машине, с помощью которой проводились планируемые исследования.

Проверка адекватности синтезированной математической модели физическому процессу фьюмингования выполнялась путем сравнения динамических характеристик процесса, полученных на электронной модели и на промышленной установке одного из металлурги-

ческих заводов. Сравнение полученных зависимостей для нескольких технологических режимов показало вполне удовлетворительное совпадение созданной модели с промышленным объектом. Расхождение кривых не превышало 3 + 4%, что подтвердило правильность выбранной модели и правомерность принятой идеализации процесса.

На электронной модели в широком диапазоне были проведены исследования фьюминг-процесса. В том числе испытывались режимы и изучались зависимости, которые невозможно получить путем промышленного эксперимента.

Полученные качественные и количественные зависимости процесса позволили установить оптимальную температуру процесса, наиболее рациональное содержание кислорода в дутье и ряд других параметров, оказывающих значительное влияние на процесс. Получена динамическая характеристика макроскопической константы скорости реакции процесса.

Было проведено исследование нелинейной системы дифференциальных уравнений, описывающих процесс, на устойчивость методом фазовой плоскости.

Исследованиями, проведенными на электронной модели было доказано, что температуру процесса в первом приближении можно считать постоянной. Исходя из этого, фьюминг-процесс можно описать системой дифференциальных уравнений второго порядка. Выведено общее уравнение системы, которое имеет вид:

$$\ddot{X} = \frac{\dot{X}^2}{X} - \tau K \dot{X} X - h \dot{X} - [a K f(\tau) - b K M(\tau)] X$$

Это существенно нелинейное уравнение второго порядка, которое имеет ряд особенностей: оно содержит квадратичный член по

координате \dot{X} , кроме того, уравнение содержит типичные нелинейности — типа производства и деления координат. Данное уравнение описывает движение системы в зависимости от начальных условий.

Исследованием данного уравнения методом фазовой плоскости установлено, что фьюминг-процесс обладает устойчивостью во всех областях его протекания. Фазовый портрет процесса содержит только одну особую точку типа устойчивого узла и особую прямую (ось абсцисс). Наличие особой прямой говорит о том, что процесс восстановления цинка протекает исключительно в прямом направлении.

Область физической осуществимости процесса находится в первом квадранте фазовой плоскости

В четвертой главе рассматривались вопросы оптимизации фьюминг-процесса и выбора системы автоматического управления.

На основании исследований, результаты которых описаны в предыдущих главах, сформулирована задача оптимального автоматического управления фьюминг-процессом и выбран критерий оптимальности, который имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} J_1 &= \max \int_0^{\tau} Q[x; y; M(\tau); f(\tau); F_0, \dots, F_j; A, z, \tau] d\tau \\ J_2 &= \int_0^{\tau} A[x; y; M(\tau); f(\tau); F_0, \dots, F_j; \tau] d\tau \leq A_{заг} \\ J_3 &= \int_0^{\tau} z[x; y; M(\tau); f(\tau); F_0, \dots, F_j; \tau] d\tau \leq z_{заг} \end{aligned} \right\}$$

где F_0, F_1, \dots, F_j — возмущающие воздействия;

A — извлечение металла из шлака;

Q — производительность;
 z — затраты на процесс.

Таким образом, выбранный критерий предусматривает максимальную производительность процесса при ограниченном извлечении металла и заданных экономических затратах. Условие максимума производительности эквивалентно условию минимума времени процесса.

С помощью электронной модели и вычислительных средств была проведена оптимизация процесса. Метод оптимизации распространим на подобные процессы, которые протекают по схеме идеального вытеснения. В результате оптимизации время процесса, отмечаемое по достижению $X_{заг} = 1\%$, уменьшается на 20%, производительность увеличивается на 10–15% и расход угольной пыли снижается за цикл около 80–90 кг, что в целом снижает себестоимость выходного продукта.

Особенностью построения системы автоматического управления фьюминг-процесса является то, что основной показатель (выход целевого продукта) во время протекания процесса не может быть получен непосредственно с объекта, а может быть снят только с модели. Поэтому включение модели в систему автоматического управления процессом является обязательным. Модель позволит осуществлять контроль управления процессом в любой момент времени или непрерывно. Использование модели в качестве прогнозатора дает возможность заранее проследить ход процесса при известных начальных условиях и произвести оптимизацию процесса в короткое время.

Предложено несколько вариантов схем систем автоматического управления фьюминг-процессом: система автоматического регулирования с программным управлением и самонастраивающаяся система автоматического управления.

К преимуществам программной системы управления относится относительная простота ее реализации. Ее можно осуществлять на первом этапе автоматизации фьюминг-процесса. Но система имеет существенный недостаток, который выражается в фиксированной программе регулирования, не учитывающей возможности разнообразных возмущений, имеющих место при ведении процесса. Поэтому предложен вариант самонастраивающейся системы, которая включает в себя непрерывную коррекцию задания регулятора в соответствии с оптимальным значением регулирующего воздействия и имеющимися возмущениями.

Рассмотрены пути модернизации самонастраивающейся системы.

В приложении № 1 приведены некоторые результаты исследования кинетики фьюминг-процесса (по литературным данным), используемые в данной работе.

В приложении № 2 приведен вывод формул расчета масштабных и передаточных коэффициентов электронной математической модели.

ВЫВОДЫ

Основным содержанием работы явилось:

- исследование физико-химических особенностей фьюминг-процесса;
- разработка математического описания процесса фьюмингования в промышленных аппаратах периодического и непрерывного действия, синтез математической модели процесса;
- исследование экспериментальными, математическими и методами электронного моделирования закономерностей периодического фьюминг процесса с целью нахождения оптимальных условий его протекания;
- разработка алгоритма системы автоматической оптимизации фьюминг-процесса.

В итоге получены следующие результаты:

1. На основании рассмотренных закономерностей протекания фьюминг-процесса предложено несколько вариантов математической модели.
2. Разработана математическая модель процесса фьюмингования для случая, когда восстановителем является окись углерода и в гетерогенной системе газ-шлак устанавливается состояние равновесия.
3. Предложена структурная схема математической модели фьюминг-процесса для случая, предполагающего активное участие твердого углерода в процессе восстановления.
4. Составлено математическое описание и схема модели для случая, предполагающего, что непосредственным восстановителем

служит закись железа, присутствующая в шлаковом расплаве.

5. На основании рассмотренных схем произведен синтез математической модели периодического фьюминг-процесса.

6. Получена математическая модель фьюминг процесса для аппаратов непрерывного действия с применением природного газа.

7. Проведены исследования фьюминг процесса на аналоговой вычислительной машине, которые выявили ряд ценных для практики зависимостей:

- при повышении температуры шлака с 1150° до 1450°C время процесса сокращается на 35%;

- наиболее целесообразно осуществлять подогрев дутья до 250°C ;

- наиболее рациональная степень обогащения дутья кислородом равна 30%;

- с повышением содержания углерода в угольной пыли с 72 до 100%, продолжительность процесса сокращается более чем в полтора раза;

- температура процесса и количество восстановителя в дутье находятся в противоположной по знаку зависимости от коэффициента расхода воздуха.

8. Исследованием фьюминг-процесса на фазовой плоскости показано, что наибольшие скорости процесса наблюдаются при высоких концентрациях цинка в шлаке.

9. Установлено, что система уравнений, описывающая процесс, имеет одну особую точку на фазовой плоскости, типа устойчивого узла и область физической осуществимости процесса ограничена положительными осями координат.

10. Сформулирована задача оптимального автоматического управления фьюминг-процессом. Разработан критерий оптимальности процесса и рассмотрен вопрос выбора управляющего воздействия для оптимизации процесса.

11. Произведена оптимизация процесса фьюмингования и выбран алгоритм оптимального управления.

12. Предложены два варианта построения системы автоматического управления фьюминг-процессом: программного управления и самонастраивающейся системы.

Основные результаты работы докладывались на Второй научно-технической сессии Московского института стали и сплавов, январь 1966 г.

Основные материалы диссертации опубликованы автором в следующих работах:

1. Математическая модель процесса восстановления металла углеродистым топливом из жидкого шлака. Известия ВУЗ, "Цветная металлургия", № 4, 1965 (совместно с Лисовским Д.И.).

2. Математическое моделирование фьюминг-процесса "Автоматизация регулирования и управления производственными процессами в цветной металлургии", изд. ЦИИЦветмет, М., 1965 (совместно с Лисовским Д.И.).

3. Исследование фьюминг-процесса моделированием "Автоматизация регулирования и управления производственными процессами в цветной металлургии", изд. ЦИИЦветмет, М., 1965 (совместно с

Лисовским Д.И.).

4. Оптимизация периодического фьюжн-процесса с помощью электронно-вычислительных устройств. "Цветная металлургия", № 17, 1966 (совместно с Лисовским Д.И., Стаховским Р.И., Голубевым В.И.).

Подписано к печати 12/1У - 1967г.

Бумага 60x90 1/16 - 0,75 б.л. - 1,75п.л. - 1 уч. - изд.л.

Л - 69055 Заказ 157 Тираж 150

Институт "Цветметинформация"