

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ПАВЛОДАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им.С.ТОРАЙГЫРОВА



4'2003



ПМУ хабаршысы
Вестник ПГУ

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ И ПЕРЕХОДНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ СВЕРХМОЩНЫХ РУДОВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

В.Ф. Хацевский, Я.А. Кузьмич

Павлодарский государственный университет им. С. Торайгырова

Мақалада кенді қалпына келтіру электр пешінің қарсы күшін зерттеу нәтижелерімен жұмысын жеделдету мәселелері қарастырылады.

В статье рассматриваются результаты исследования сопротивления рудовосстановительной электропечи для повышения эффективности ее работы.

The results of researches of resistance for the ore electrothermal furnace for increase of efficiency of its work are considered in this article.

Производство продукции в современных рудовосстановительных электропечах (РВП) основано на комплексных электротехнологических процессах, которые определяются нелинейными взаимосвязями электрических, термодинамических, химических, газо- и гидродинамических параметров, самоустанавливающихся в рабочем пространстве электропечей. Сложность протекания взаимосвязанных процессов определило развитие теории РВП на основе критериев подобия, которые позволяют провести перерасчет параметров оптимальных квазистационарных режимов с номинальной мощностью

«образцовой» электропечи для электропечей большей мощности с определением номинальных электрических параметров квазистационарного режима и, что особенно важно, новых геометрических размеров рабочего пространства и электродов для осуществления этих режимов. В теории РВП понятие «оптимальные режимы» неразрывно связано с геометрическими параметрами конкретного рабочего пространства электропечи, а работающая в оптимальных номинальных режимах электропечь при конкретных конструктивных решениях (диаметр электродов, диаметр распада электродов, диаметр и высота электропечи и др.) при снижении вводимой мощности обеспечивает режимы работы, отличающиеся от рассчитанных по теории подобия РВП [1,2,3].

Для развития теоретического понимания возможных изменений электротехнологических процессов в конкретной электропечи при снижении вводимой мощности нами приняты в качестве исходных основные положения самоорганизации электро- и тепломассообмена, установленные в теории РВП для квазистационарных номинальных режимов и изложенные в научных обобщающих работах А.Н. Попова и В.П. Воробьева. В рабочем пространстве РВП выделяют четыре области преобразования электрической энергии в тепловую: газоплазменная полость – электрическая дуга в подэлектродном пространстве (фазное сопротивление R_{φ}), стенки реакционного тигля (фазное сопротивление R_r), шихта между электродами (линейное сопротивление $R_{ш}$) и шихта между электродами и стенкой футеровки (обобщенное линейно-фазное сопротивление R_{cm}). Для разработки методов длительной эксплуатации РВП в режимах, существенно отличающихся от номинальных с сохранением нормального хода технологического процесса, проведены исследования на промышленных электропечах изменений энергораспределений между различными областями рабочего пространства РВП. Эти изменения определяются электрическими и тепловыми режимами и, следовательно, объемнораспределенными активными и реактивными сопротивлениями этих областей.

При анализе нестационарных режимов работы РВП установлено, что при снижении вводимой мощности происходят изменения электрических, тепловых и технологических процессов, которые включают последовательные периоды по времени протекания с существенно различающимися постоянными времени протекания процессов, определяющих эти периоды режима. Установлены следующие закономерности развития указанных процессов [5].

1. Для обеспечения нормального хода технологического процесса при любых мощностях необходимо существование самоподдерживающихся газоплазменных подэлектродных областей (закрытой теплоизолированной дуги). Показано, что при

снижении вводимой мощности в подэлектродное пространство уменьшается объем газоплазменной полости с сохранением геометрического подобия, идентичности состава газовой среды, постоянства температуры с последующим самоустанавливающимся квазиравенством объемных плотностей энергии в газоплазменной полости за счет изменения ее объема (рис. 1). В номинальном режиме, когда обеспечивается соотношение $U_{max} = CP^n$ при $n = 0,33$ (для выплавки FeSi), напряжение на дуге прямо пропорционально току в узком интервале параметров, когда обеспечивается электрическое, геометрическое и температурно-технологическое подобие. Для этого интервала параметров справедлива гипотеза М.Я. Смелянского и А.Н. Попова о постоянстве сопротивления дуги R_d для большинства восстановительных технологий. При снижении или увеличении вводимой мощности в период неустановившихся (переходных) режимов значение n изменяется от 0,25 до 0,5, C – от 0,5 до 0,25. Форма и геометрические размеры проводящих зон (l, d, a на рис. 1) в переходных режимах меняются так, чтобы значения n и C восстанавливались до величин $n = 0,33$ и $C = 0,47...0,49$. Отличие n и C от этих значений указывает на неустойчивость и отличие от оптимальности протекающих процессов.

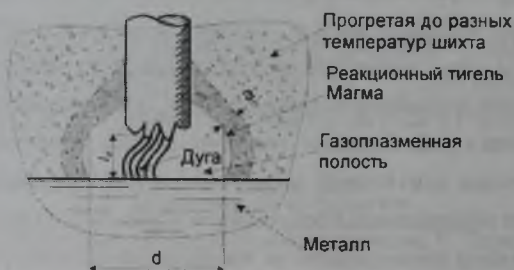


Рис. 1

Общая схема строения подэлектродного пространства РВП

Снижение плотности тока на торце электрода и изменение напряжения на дуговом промежутке (U_d/U_m) вызывает появление или увеличение паузы протекающего тока через дугу. За паузу тока принимались участки на осциллограммах, для которых $i_d/i_{max} \leq 8$. При снижении амплитудного значения полезного напряжения на торце электрода до значений, соизмеримых с напряжением на дуге $U_d = U_{a-k} + \beta \cdot l_d$, где U_{a-k} – сумма прикатодного и прианодного падений напряжения, β – градиент потенциала в столбе дуги, l_d – длина дуги, ток через газоплазменную подэлектродную зону становится близким к нулю. Выполненные расчеты энергетического баланса в подэлектродном пространстве при конкретных диаметрах электродов (1200...1900 мм) показали, что поддержание нормального технологического процесса плавки возможно при снижении вводимой мощности

на 25...50% от номинальной мощности одной фазы электропечи и зависит от диаметра электрода. Доказано, что при уменьшении величины U_d/U_m коэффициент искажения тока изменяется от $K = 0,95$ в номинальном режиме до $K = 0,9$ при мощности $P = 0,75 P_{ном}$ (электропечь РКЗ-21).

2. Сопротивление дуги шунтируется стенками реакционного тигля (R_T) и шихтой между электродами и стенкой проводящей футеровки (R_w и R_{cm}). При снижении мощности сопротивление реакционного тигля (R_T) становится основным шунтирующим каналом. Анализ этой области основывался на известных расчетно-теоретических результатах исследований: температура в рабочей части тигля для любого рудовосстановительного процесса оптимальна, постоянна и самоподдерживается; любое уменьшение (или увеличение) поступающей в эту область энергии компенсируется изменением скоростей эндотермических реакций восстановления. При изменениях вводимой в эту область энергии за счет токов проводимости (джоулев нагрев) и теплообмена с газоплазменной полостью самоподдерживается квазистационарный температурный режим с одновременным изменением геометрических размеров реакционного тигля (см. рис. 1) за счет диаметра d , радиальной протяженности слоя a и расстояния между торцом электрода и расплавом (длина дуги l_d). Установлено, что для квазистационарного (номинального) режима сопротивление этой области зависит от 5 параметров: $R_T = f(\rho(T), n, W, I, S)$, где $\rho(T)$ - локальное удельное электрическое сопротивление слоя, n - крагность шлака, W - удельный расход электроэнергии на тонну металлического продукта, I - рабочий ток, S - площадь токнесущего слоя стенок тигля, T - температура в слое. В динамических режимах кроме указанных параметров сопротивление реакционного тигля R_T определяется плотностью энергии, поступающей из газоплазменной полости на внутреннюю поверхность тигля q_s , а площадь токнесущего слоя стенок тигля зависит от изменения d, a, l_d . Изменение по времени $R_T = f(\tau)$ определяется изменением температурного поля; постоянная времени изменения процесса $\tau > 600$ с. Эта область является определяющей для производительности РВП, самоподдерживает оптимальные технологические температуры, а нормальный ход технологического процесса возможен при $q_s \gg 0$.

3. Используя методологический подход Н.А. Маркова и В.П. Воробьева, установлено, что в квазиустановившихся режимах работы исследованных электропечей формы кривых общего тока и напряжения в электрической цепи, содержащей дугу (R_d) и активные линейные сопротивления $R_T, R_{ш}, R_{cm}$, являются суммами характерных форм тока и напряжения дуги [2], а формализованная динамическая вольтамперная характеристика (ВАХ) состоит из двух линейных участков (рис. 2). Для номинального режима (ВАХ - точки [о], [с], [е]) участок А

характеризует протекание тока через эквивалентное сопротивление R_{Σ} ($1/R_{\Sigma} = 1/R_j + K_1/R_{ш} + K_2/R_{см}$), а участок B – протекание тока через дугу (R_d) и сопротивление R_{Σ} . Углы наклона этих участков (α и β) зависят от проводимости $1/R_j$ (α) и суммы проводимостей $1/R_j$ и $1/R_{\Sigma}$ (β), а форма тока – от отношения сопротивлений R_d/R_{Σ} .

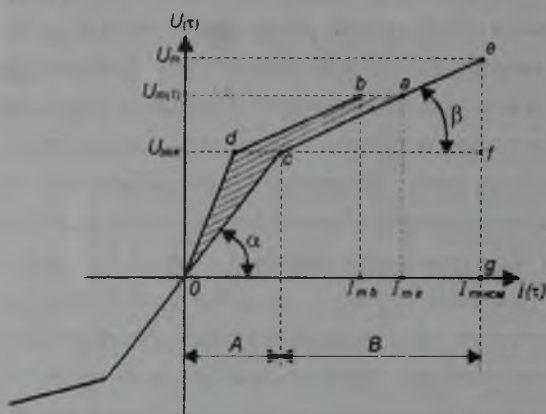


Рис. 2

Динамическая вольтамперная характеристика фазы РВП

В начальный период уменьшения вводимой мощности путем снижения напряжения от U_m до $U_{m(1)}$ температурное поле в реакционном пространстве из-за инерционности не изменяется, напряжение зажигания теплоизолированной дуги ($U_{нз}$) близко к квазипостоянной величине. В момент переключения динамическая ВАХ сохраняет свои параметры и устанавливается ток, соответствующий точке [a] - $I_{нз}$. При неизменной длине дуги (l_d) в течении времени неустановившихся режимов за счет изменения температурного поля эквивалентное сопротивление RS увеличивается (заштрихованная область на рис. 2), координата точки [c] перемещается в точку [d], а амплитудное значение тока уменьшается до $I_{нб}$. При уменьшении длины дуги (поддержание тока $I_{нз}$ автоматическим регулятором) динамическая ВАХ имеет вид [o], [d], [a]. Время перехода из одного квазистационарного режима ($P = P_{ном}$) к другому ($P = 0,75 P_{ном}$) для электропечи РКЗ-21 составляет $\tau = 600$ с, для электропечи РПЗ-63 – $\tau = 1000$ с. Продолжительность неустановившегося режима определялась при проведении экспериментов по изменению образующихся продуктов (производительности) и по изменению состава и температуры отходящих газов.

4. Необходимое качество получаемых продуктов при максимуме производительности обеспечивается в РВП при постоянстве критериев электрического и технологического подобия процессов.

$$\text{Эп} = \frac{U_{\text{ост}} \cdot d}{I \cdot S_{\text{эф}}} = F \left[T_{\text{п}}^n \left(\frac{\gamma_{\text{к}}}{\gamma} \right)^{m_1} \left(\frac{d}{r_0} \right)^{m_2} \right] = \text{const}, \quad (1)$$

$$U_{\text{пит}} = C \cdot P^n;$$

$$T_{\text{п}} = \beta \cdot q_{\text{коксик}} \cdot C_{\text{MeO}} \cdot r_0 / P.$$

Анализ (1) показывает, что для действующей РВП при изменении мощности P в переходном режиме и в последующем – квазиустановившемся, необходимо изменять соотношения составляющих шихты: C_{MeO} – состав шихты в реакционной зоне (содержание MeO в шихте), $q_{\text{коксик}}$ – расход электроэнергии на единицу массы коксика, участвующего в эндотермической реакции с учетом теплосодержания покидающих зону компонентов (производительности печи). При этом необходимо обеспечивать постоянство плотности упаковки коксика в реакционной зоне ($\gamma_{\text{к}} / \gamma$), скорости реакции восстановления в реакционном тигле [$\beta = f(T_{\text{реакц}})$], гранулометрического состава шихты (r_0) [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Хацевский В.Ф. Нестационарные режимы работы рудовосстановительных электропечей: – Павлодар: Изд-во ЭКО, 2001. – 144 с.
2. Хацевский В.Ф., Хацевская Т.В. Теоретические исследования динамической модели нестационарного технологического процесса руднотермической электропечи. //Вестник ПГУ. – 2001. – № 1. – С. 38–43.
3. Чередниченко В.С., Хацевский В.Ф. Проблемы ресурсосбережения при эксплуатации рудовосстановительных электропечей. //Сб. науч. трудов НГТУ Экологически перспективные системы и технологии. Ресурсосбережение. – 2002. – Вып. 5. – С. 74-86.
4. Хацевский В.Ф. Рудовосстановительные электропечи (Расчеты параметров и исследования): – Павлодар: Изд-во ЭКО, 2002. – 188 с.
5. Хацевский В.Ф. Экспериментальные исследования нестационарных режимов работы рудовосстановительных электропечей. //Научный вестник НГТУ. – Новосибирск, 2002. – № 1 (12)– С. 141-150.