УДК 669.187.004.18

К. В. Яшина
Днепродзержинский государственный технический университет

ОДИН ИЗ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

В статье приводится описание комплексной математической модели, используемой для рационального управления работой дуговых электросталеплавильных печей.

Ключевые слова: *дуговая сталеплавильная печь, рациональное управление, комплексная математическая модель, уравнение теплопроводности, начальные и граничные условия.*

Введение. Актуальной на сегодняшний день является проблема выбора оптимального управления процессом плавки шихты в дуговых электросталеплавильных печах. Это связано с энергоемкостью дугового электросталеплавильного производства при постоянном росте цен энергоносителей. Кроме того, благодаря своим множественным достоинствам, электросталь занимает лидирующие позиции на мировом рынке, годовые показатели ее производства уверенно растут. Следовательно, необходимы новые современные подходы к режимам ведения плавки в дуговых печах, обеспечивающие минимизацию энергозатрат.

Автор предлагает свой подход к управлению процессом плавки в дуговых электросталеплавильных печах [1].

Постановка задачи. Для качественной проверки адекватности предложенного метода управления и контроля процессом плавки в дуговой сталеплавильной печи автором было рассмотрено несколько модельных задач упрощенной постановки, описывающих процесс проплавления колодцев во время плавки шихты в дуговой электросталеплавильной печи. В результате предложенный алгоритм управления позволил существенно сократить затраты тепла и времени на расплавление шихты, а значит управление процессом расплавления, осуществляемое с помощью данного алгоритма, можно считать рациональным. Однако адекватность поведения процесса обеспечивается с помощью использования адекватной математической модели, результаты которой имеют минимальное отклонение от реального поведения процесса [2]. Рассмотрим такую модель для стадии проплавления колодцев во время плавки шихты в дуговой печи.

Результаты работы. На стадии проплавления колодцев электрические дуги заглубляются в шихту, металл под электродами расплавляется и перетекает на подину. Продолжает расти двухфазная область, заполненная жидким металлом и кусками твердой нерасплавившейся шихты. Масса расплавленного металла зависит от величины вводимой мощности и насыпной плотности шихты, которые определяют размер колодцев. Скорость плавления шихты на этой стадии минимальна, т.к. значительная часть мощности идет на прогрев всей массы шихты теплопроводностью. Температура внутренней поверхности футеровки снижается и ее тепло аккумулируется шихтой. Температура футеровки стен печи в периоде проплавления колодцев достигает минимального значения на всем протяжении процесса расплавления шихты 1400 ^{0}C, свода 1600 ^{0}C.

Движение электродов вниз продолжается до тех пор, пока электрические дуги не придут в соприкосновение с жидким металлом, уровень которого поднимается по мере расплавления шихты.

При моделировании теплообмена на рассматриваемой стадии тепловой работы дуговой печи выделяется замкнутая система четырех серых тел – поверхность шихты F_1, поверхность свода F_2, незакрытая шихтой боковая поверхность стен F_3 и излучающая поверхность электрода F_4, представляющих собой изотермические поверхности первого рода (заданы температуры поверхностей). Между изотермической поверхностью F_1 и любой F_i результирующее излучение складывается из суммы эффективных излучений поверхностей F_j ($j \neq i$), посылаемых на поверхность F_i – $Q_{j,i}^{эф}$, и излучения, направленного последней на себя – $Q_{i,i}^{эф}$. Таким образом:

$$Q_{i,1}^{p} = Q_i^{эф} \varphi_{i,1} - Q_1^{эф} \varphi_{1,i} ,$$

где $\varphi_{i,j}$ ($i = 1,2,3,4; j = 1,2,3,4$) – угловые коэффициенты облученности, вычисляемые по формуле

$$\varphi_{ij} = \frac{F_i F_j \cos \vartheta_i \cos \vartheta_j}{\pi r_{ij}^2},$$

где F_i, F_j – площади зон, ϑ_i, ϑ_j углы между нормалями к поверхностям i и j и вектором $\vec{r}_{ij}$, соединяющим центры зон.

Результирующий поток на поверхность 1, определяемый теплообменом со всеми $n = 4$ поверхностями, составляющими систему, можно найти, просуммировав функцию $Q_{i,1}^{p}$ по индексу i от 1 до n:

$$Q_1^{p} = \sum_{i=1}^{n} Q_i^{эф} \varphi_{i,1} - \sum_{i=1}^{n} Q_1^{эф} \varphi_{1,i} = \sum_{i=1}^{n} Q_i^{эф} \varphi_{i,1} - Q_1^{эф} .$$

Для любой k-ой поверхности:

$$Q_k^{p} = \sum_{i=1}^{n} Q_i^{эф} \varphi_{i,k} - \sum_{i=1}^{n} Q_k^{эф} \varphi_{k,i} = \sum_{i=1}^{n} Q_i^{эф} \varphi_{i,k} - Q_k^{эф} .$$

Эффективные потоки связаны с результирующими соотношениями:

$$Q_i^{эф} = \left(\frac{1}{A_i} - 1 \right) Q_i^p + Q_i^0 ,$$

где A_i – поглощательная способность серого тела.

Следовательно, для результирующего излучения имеем:

$$Q_k^p = \left[\left(\frac{1}{A_i} - 1 \right) Q_i^p + Q_i^0 \right] \varphi_{i,k} - \left(\frac{1}{A_k - 1} \right) Q_k^p - Q_k^0 ,$$

что справедливо для любого из серых тел, входящих в систему. При этом собственное излучение поверхности определяется формулой:

$$Q_i^0 = \varepsilon_i \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \cdot F_i ,$$

где $\sigma_0 = 5{,}67 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 К^4}$ – постоянная Стефана-Больцмана, ε_i – степень черноты поверхности серого тела.

Распределение температур в объеме шихты описывается уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$c_ш \rho_ш \frac{\partial T_ш(r,\varphi,z,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_ш r \frac{\partial T_ш(r,\varphi,z,\tau)}{\partial r} \right) +$$

$$+ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_ш \frac{\partial T_ш(r,\varphi,z,\tau)}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_ш \frac{\partial T_ш(r,\varphi,z,\tau)}{\partial z} \right),$$

$$Z_б < z < Z_ш .$$

Распределение температур в объеме “болота” на данном этапе описывается уравнением:

$$c_ш \rho_ш \frac{\partial T_ш(r,\varphi,z,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_ш r \frac{\partial T_ш(r,\varphi,z,\tau)}{\partial r} \right) +$$

$$+ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_ш \frac{\partial T_ш(r,\varphi,z,\tau)}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_ш \frac{\partial T_ш(r,\varphi,z,\tau)}{\partial z} \right).$$

Начальным условием для этих уравнений в рассматриваемом периоде является поле температур для “болота” $T_б$ и шихты $T_ш$.

На оси симметрии печи задано условие симметрии:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial T_б(r=0,\varphi,z,\tau)}{\partial r} = 0 \\ \dfrac{\partial T_ш(r=0,\varphi,z,\tau)}{\partial r} = 0. \end{cases}$$

На границе “болото” – шихта ($z = Z_б(\tau)$) задано граничное условие IV рода:

$$\begin{cases} \lambda_{ш} \dfrac{\partial T_{ш}(r,\varphi,Z_{б},\tau)}{\partial z} = \lambda_{б} \dfrac{\partial T_{б}(r,\varphi,Z_{б},\tau)}{\partial z} \\ T_{ш}(r,\varphi,Z_{б},\tau) = T_{б}(r,\varphi,Z_{б},\tau). \end{cases}$$

На поверхности соприкосновения шихты с футеровкой стен печи или пода заданы граничные условия III рода

$$-\lambda_{ш} \frac{\partial T_{ш}(r=R_{ш},\varphi,z,\tau)}{\partial z} = \alpha_{ст}(T_{ш}(r=R_{ш},\varphi,z,\tau) - T_{ст})$$

$$-\lambda_{ш} \frac{\partial T_{ш}(r,\varphi,z=0,\tau)}{\partial z} = \alpha_{дн}(T_{ш}(r,\varphi,z=0,\tau) - T_{дн}) \, .$$

В зоне пятна дуги (на подвижной границе дна колодца) на поверхности шихты задано граничное условие радиационного теплообмена:

$$-\lambda_{ш} \frac{\partial T_{ш}(r,\varphi,z=Z_k(\tau),\tau)}{\partial z} =$$

$$= \varepsilon_{ш}\sigma_0 \left((T_{дуги} + 273)^4 - (T_{ш}(r,\varphi,z=Z_k(\tau),\tau) + 273)^4 \right).$$

На верхней поверхности шихты ($z = Z_{ш}$) задано условие лучистого теплообмена в результате поглощения лучистой энергии, излучаемой сводом:

$$-\lambda_{ш} \frac{\partial T_{ш}\left(r,\varphi,z=Z_{ш},\tau\right)}{\partial z} = \varepsilon_{св}\sigma_0 \left((T_{св} + 273)^4 - \left(T_{ш}(r,\varphi,z=Z_{ш},\tau) + 273\right)^4 \right).$$

Плотность шихты $\rho_{ш}$ ($T_{ш}$, r, φ, z) в начале плавки принимается постоянной по объему, а затем в ходе плавления и перетекания металла изменяется в объеме колодца

$$\rho_{ш} = \frac{m_{ш}}{V} \, .$$

Изменение плотности шихты вызовет изменение ее теплопроводности. Учитывая допущение о приближении насыпного слоя металлошихты в виде полых сферических частиц, согласно [3] принимаем, что 2/3 теплового потока проходит в насыпном слое металлошихты внутри пор, а 1/3 – теплопроводностью внутри твердой фазы. Тогда коэффициент теплопроводности шихты $\lambda_{ш}$ с учетом принятого допущения определяется в первом случае:

$$\lambda_{ш} = \lambda_{м}\left[1 - \left(1 - \frac{\lambda_{п}}{\lambda_{м}}\right)p\right], \text{ а во втором } \lambda_{ш} = \lambda_{м} \frac{1}{1 + \left(\dfrac{\lambda_{п}}{\lambda_{м}} - 1\right)p},$$

где $\lambda_{м}$ – усредненная теплопроводность лома, $\lambda_{п}$ – теплопроводность газовых прослоек.

Причем $\lambda_{п}$=$\lambda_{д}$+$\lambda_{л}$, где $\lambda_{д}$ – коэффициент теплопроводности дымовых газов, зависящий от температуры; $\lambda_{л}$ – коэффициент, учитывающий излучение внутри прослоек:

$$\lambda_л = 0{,}04\varepsilon_{пр} c_0 \left(\frac{t+273}{100}\right)^3 \delta,$$

где t – температура стенок прослойки, $℃$, δ – толщина прослойки, ε_0 – степень черноты лома, $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты стенок прослойки, определяемая формулой:

$$\varepsilon_{пр} = \frac{1}{\left({}^2\!/_{\varepsilon_0} - 1 \right)}.$$

Автором данная математическая модель в двумерной постановке была выполнена в среде Delphi 8. При этом получены результаты близкие к реальному поведению процесса.

Выводы. Таким образом, представленная математическая модель может быть положена в основу разработанного автором алгоритма управления. При этом под идеальным балансом подразумеваем расплавление всех слоев шихты за определенный заданный промежуток времени Статьи энергетического баланса: температура шихты, тепло, излучаемое дугой. Статьи материального баланса: масса шихты и сила тока. Сила тока рассматривается как управляющий параметр. Так как и для алгоритма управления, и для математической модели была проведена качественная проверка адекватности, то осуществляемое с их помощью управление должно обеспечить рациональность поведения процесса.

Список использованной литературы:

1. Яшина К. В., Болотов В. Ю., Болотова Ю. А. Усовершенствование способов автоматизированного управления работой дуговых сталеплавильных печей на основе комплексной математической модели для снижения энергозатрат и повышения производительности агрегата // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – 2007. – №8. – С.217-221.
2. Яшина К. В., Болотов В. Ю. Качественная оценка способа автоматизированного управления работой дуговых сталеплавительных печей на основе комплексной математической модели // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета. – 2008. – Выпуск 1(9). – С.14-19.
3. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / Ю. И. Розенгарт, Б. Б. Потапов, В. М. Ольшанский, А. В. Бородулин. – Киев; Донецк: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 296 с.

In article the description of the complex mathematical model used for rational management by work of arc electrosteel-smelting furnaces is resulted.

Key words: *the arc steel-smelting furnace, rational management, complex mathematical model, the equation of heat conductivity, initial and boundary conditions.*

Отримано: 20.05.2008