

ТЕПЛОТЕХНИКА

Լ. Բ. ԱՄԻՅԱՆ, Վ. Կ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Ա. Յ. ԿԱՐԱՄՏՅԱՆ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОВАРКИ СТЕКЛА

Создание совершенной системы регулирования теплового режима имеет большое значение для повышения технико-экономических показателей электроварки стекла. В настоящей работе сделана попытка построения математической модели электростекловаренной печи прямого нагрева, пригодной для исследования и разработки систем автоматического управления тепловым режимом варки стекла в таких печах.

Для электростекловаренной печи, принимая, что теплотехнические параметры являются усредненными и сосредоточенными, уравнение теплового баланса установившегося режима — уравнение статики имеет вид:

$$\begin{cases} Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \\ Q_1 = Q_7 \end{cases} \quad (1)$$

где Q — количество тепла, выделяемого в стекломассе при прохождении электрического тока, ккал/ч ; Q_1, Q_2 — потери на теплообмен между стекломассой и футеровкой и на охлаждение электродов, ккал/ч ; Q_3 — тепло, уносимое расплавом в выработочную зону, ккал/ч ; Q_4, Q_5 — затраты тепла на нагрев шихты до номинальной температуры и на процесс стеклообразования, ккал/ч ; Q_6, Q_7 — потери тепла на испарение влаги шихты и на теплообмен между футеровкой и внешней средой, ккал/ч .

Рассматривая перечисленные выше статьи расхода-прихода тепла, можно написать следующие линейные приближения, справедливые с практической степенью точности в области малых отклонений:

$$Q = k \frac{V^2}{R}; \quad Q_1 = \alpha_1 F (\theta - \theta_n); \quad Q_2 = \alpha_2 F_s (\theta - \theta_n); \quad Q_3 = c q \theta;$$

$$Q_4 = c_{ш} q (\theta - \theta_{ш}); \quad Q_5 = c_{г} q; \quad Q_6 = c_r q_r \theta_r; \quad Q_7 = \alpha_7 F (\theta_0 - \theta_n),$$

где V — напряжение на электродах печи, в ; R — сопротивление расплава печи, ом ; k — эквивалентный коэффициент, $\text{ккал/вт} \cdot \text{ч}$; $\alpha_1 - \alpha_3$ — коэффициенты теплоотдачи, $\text{ккал/град} \cdot \text{ч} \cdot \text{м}^2$; θ, θ_0 — усредненные температуры расплава и футеровки, град ; F, F_s — площади футеровки и электродов, м^2 ; $\theta_n, \theta_{ш}$ — температуры охлаждающей воды, окружающей среды и шихты, град ; $c, c_{ш}, c_r$ — удельные теплоемкости расплавленной стекломассы, шихты (усредненная) и смеси газов, $\text{ккал/кг} \cdot \text{град}$;

q — количество загруженной шихты в час, кг/ч; γ — расходный коэффициент, показывающий, какая часть шихты, загружаемой в печь, выходит из нее в виде расплава; λ — количество тепла, затрачиваемого на физико-химические превращения в шихте, ккал/кг; q_r — количество выделившихся газов, кг/с; θ_r — температура отходящих газов, град.

Потери Q_2 и Q_6 составляют незначительную долю в общем тепловом балансе и ими можно пренебречь.

Переходя от уравнений статики (1) к уравнениям динамики, можно записать:

$$\begin{cases} \Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3 + \Delta Q_4 + C \frac{d\theta}{dt}; \\ \Delta Q_2 = \Delta Q_1 + C_\phi \frac{d\theta_\phi}{dt}, \end{cases} \quad (2)$$

где C , C_ϕ — теплоемкости расплава и футеровки, ккал/град.

Проведя линеаризацию при помощи формул Тейлора, найдем, что

$$\Delta Q = \frac{2kV_0}{R_0} \Delta V - \frac{kV_0^2}{R_0^2} \Delta R = \frac{2kV_0^2}{R_0} y - \frac{kV_0^2}{R_0} x_1;$$

$$\Delta Q_1 = \alpha_1 F \Delta \theta - \alpha_1 F \Delta \theta_\phi = \alpha_2 F \theta_\phi x - \alpha_1 F \theta_\phi x_\phi;$$

$$\Delta Q_3 = c_1 q_0 \Delta \theta + c_1 \theta_0 \Delta q = c_1 q_0 \theta_0 x + c_1 q_0 \theta_0 z;$$

$$\Delta Q_4 = c_m q_0 \Delta \theta + c_m (\theta_0 - \theta_m) \Delta q = c_m q_0 \theta_0 x + c_m q_0 (\theta_0 - \theta_m) z;$$

$$\Delta Q_5 = \lambda \gamma \Delta q = \lambda \gamma q_0 z;$$

$$\Delta Q_2 = \alpha_2 F \Delta \theta_\phi = \alpha_2 F \theta_{\phi_0} x_\phi,$$

где $x = \frac{\Delta \theta}{\theta_0}$; $x_\phi = \frac{\Delta \theta_\phi}{\theta_{\phi_0}}$; $x_1 = \frac{\Delta R}{R_0}$; $y = \frac{\Delta V}{V_0}$; $z = \frac{\Delta q}{q_0}$ — относительные изменения переменных. Здесь индексов „0“ отмечены значения параметров, соответствующих номинальному режиму.

Известно, что зависимость электропроводности расплавленной стекломассы $\rho(\theta)$ от температуры выражается трансцендентным уравнением

$\rho = \frac{1}{A} e^{\frac{B}{\theta}}$, где A и B — коэффициенты, зависящие от состава стекла [1].

Применение этого уравнения для исследования динамики тепловых процессов представляет известные трудности. Поэтому в работе была использована упрощенная зависимость $\rho(\theta)$. Принимая, что

$\rho' = \frac{d\rho}{d\theta}$ в области малых отклонений от номинальной температуры остается постоянной, можно записать:

$$x_1 = \frac{\Delta R}{R_0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} = -\gamma \theta_0 x, \quad (3)$$

где $\gamma_1 = \frac{V_0^2}{R_0}$ — показатель саморазрегулирующей способности расплавленной стекломассы, предложенный Андрусечко [3]. Тогда:

$$\Delta Q = \frac{2kV_0^2}{R_0} y + \frac{k\gamma_0 V_0^2}{R_0} x.$$

Подставив полученные значения ΔQ_i в систему (2), получим:

$$\begin{cases} \frac{2kV_0^2}{R_0} y + \frac{k\gamma_0 V_0^2}{R_0} x = \alpha_1 F \theta_0 x - \alpha_1 F \theta_{0\phi} x_\phi + c_1 q_0 \theta_0 x + c_1 q_0 \theta_0 z + \\ + c_m q_0 \theta_0 x + c_m q_0 (\theta_0 - \theta_m) z + k_1 q_0 z + C \theta_0 \frac{dx}{dt}; \\ \alpha_1 F \theta_0 x - \alpha_1 F \theta_{0\phi} x_\phi = \alpha_1 F \theta_{0\phi} x_\phi + C_\phi \theta_{0\phi} \frac{dx_\phi}{dt}. \end{cases} \quad (4)$$

Введя оператор дифференцирования и проведя соответствующие преобразования, получим уравнение

$$(T_2^2 p^2 + T_1 p + 1) x = k (T_3 p + 1) - k_2 (T_3 p + 1) z, \quad (5)$$

где T_1 , T_2 , T_3 — постоянные времени варочной зоны, а k , k_2 — соответствующие коэффициенты усиления.

Коэффициенты усиления и постоянные времени могут быть вычислены по формулам:

$$T_1 = \frac{C_\phi (\alpha_1 F R_0 + c_1 q_0 R_0 + c_m q_0 R_0 - 2k\gamma_1 V_0^2) + (\alpha_1 + \alpha_3) C}{F (\alpha_1 \alpha_3 F R_0 + (\alpha_1 + \alpha_3) (c_1 q_0 R_0 + c_m q_0 R_0 - 2k\gamma_1 V_0^2))};$$

$$T_2^2 = \frac{CC_\phi R_0}{F |\alpha_1 \alpha_3 F R_0 + (\alpha_1 + \alpha_3) (c_1 q_0 R_0 + c_m q_0 R_0 - 2k\gamma_1 V_0^2)|};$$

$$T_3 = \frac{C_\phi}{F (\alpha_1 + \alpha_3)};$$

$$k = \frac{2kV_0^2 (\alpha_1 + \alpha_3)}{\theta |\alpha_1 \alpha_3 F R_0 + (\alpha_1 + \alpha_3) (c_1 q_0 R_0 + c_m q_0 R_0 - 2k\gamma_1 V_0^2)|};$$

$$k_2 = \frac{R_0 [c_1 q_0 \theta_0 + c_m q_0 (\theta_0 - \theta_m) + k_1 q_0] (\alpha_1 + \alpha_3)}{\theta_0 |\alpha_1 \alpha_3 F R_0 + (\alpha_1 + \alpha_3) (c_1 q_0 R_0 + c_m q_0 R_0 - 2k\gamma_1 V_0^2)|}.$$

Исходя из уравнения (5), можно записать передаточные функции электростекловаренной печи по управляющему и возмущающим воздействиям

$$W(p) = \frac{x(p)}{y(p)} = \frac{k(T_3 p + 1)}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

$$W_z(p) = \frac{x(p)}{z(p)} = \frac{k_2(T_3 p + 1)}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}.$$

Управление тепловым режимом электростекловаренной печи непосредственно по температуре встречает ряд существенных трудностей. Более надежным и целесообразным, как показывает многолетний опыт эксплуатации электростекловаренных печей, является регулирование теплового режима по косвенным электрическим параметрам — межэлектродному сопротивлению, току нагрузки или мощности, выделяемой в расплавленной стекломассе.

Передаточная функция варочной зоны электростекловаренной печи при использовании в качестве регулируемого параметра межэлектродного сопротивления, с учетом уравнения (3), будет иметь вид

$$W_1(p) = \frac{x_1(p)}{y(p)} = \frac{k_1(T_1 p + 1)}{T_1^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

где $k_1 = k_1 \theta_0$.

Обозначив через $x_2 = \frac{\Delta J}{J_0}$ — относительное отклонение тока нагрузки и проведя линеаризацию, можно записать: $x_2(p) = y(p) - x_1(p)$.

Тогда передаточная функция электростекловаренной печи, при использовании в качестве регулируемого параметра — тока нагрузки, примет вид:

$$W_2(p) = \frac{x_2(p)}{y(p)} = \frac{k_2(T_{22}^2 p^2 + T_{12} p + 1)}{T_1^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

где $k_2 = 1 - k_1$; $T_{22}^2 = \frac{T_1^2}{1 - k_1}$; $T_{12} = \frac{T_1 - k_1 T_1}{1 - k_1}$.

Обозначив $x_3 = \frac{\Delta W}{W_0}$ — относительное изменение мощности, аналогично предыдущему, можно записать: $x_3(p) = y(p) + x_2(p)$, а передаточную функцию электроварки стекла при использовании в качестве регулируемого параметра электрической мощности, выделяемой в расплавленной стекломассе при прохождении через него электрического тока

$$W_3(p) = \frac{k_3(T_{33}^2 p^2 + T_{13} p + 1)}{T_1^2 p^2 + T_1 p + 1},$$

где $k_3 = 2 - k_1$; $T_{33}^2 = \frac{2T_1^2}{2 - k_1}$; $T_{13} = \frac{2T_1 - k_1 T_1}{2 - k_1}$.

Экспериментальные исследования, проведенные на промышленных и опытно-промышленных электростекловаренных печах, показали адекватность полученной математической модели. Передаточные функции, приведенные в работе, были использованы при разработках САУ тепловым режимом промышленных электростекловаренных печей.

Լ. Ռ. ԱՄԻՅԱՆ, Վ. Կ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ, Հ. Վ. ԿԱՐԱՊԵՏՅԱՆ

ԱՊԱԿՈՒ ԷԼԵԿՏՐԱԵՓՄԱՆ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈԳԵԼԸ

Ու մ փ ո փ ո ռ մ

Աշխատանքում բերված է անմիջական տաքացման էլեկտրական վառարանում ասվակու հալման պրոցեսի մաթեմատիկական մոդելը: Եփման ջերմային ռեժիմի ինչպես անմիջական ջերմաստիճանով, այնպես էլ անուղղակի էլեկտրական պարամետրերով կառավարման համար ստացված են փոխանցման ֆունկցիաները ըստ կարգավորող ու խոտորող ներգործումների: Ստացված մաթեմատիկական մոդելները կարելի է օգտագործել արդյունաբերական էլեկտրաեփման վառարանների ջերմային ռեժիմների ավտոմատ կառավարման համակարգերի նախագծման գեպրում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Костиня К. А. Электропроводность расплавленных стекол и некоторые вопросы электроварки стекла. «Арм. химический журнал», 1967, № 10.
2. Лалтев В. Н. Системы автоматического регулирования температурного режима установок с электроподогревом стекломассы «Стекло», 1975, № 2.
3. Andrzejewski A., Czekło i ceramika, 16, 209, 1965.