

The mathematical formulation of the problem of the aluminium electrolyzer thermal condition at hearth flame kilning presented by the non-stationary equation of heat conductivity with internal heat sources and also a technique of the computational solution of this equation based on a finite elements method were submitted. The numerical model of electrolyzer C-175 for which temperature fields of hearth at flame kilning were defined by the developed procedure was engineered. It was shown that numerical computation results are in satisfactory fit with experimental data. It was recommended to use the developed technique for hearth's temperature fields forecasting for projecting of science-based regulations of the electrolyzers with fired anodes of various capacity flame kilning.

Keywords: aluminium electrolyzer, hearth, kilning, temperature field, heating rate, heat, numerical model.

Поступила в редакцию 20 мая 2011 года

УДК 536.2

**ПАНОВ Е. Н., д.т.н., проф., КАРВАЦКИЙ А. Я., д.т.н., проф., ШИЛОВИЧ И. Л., к.т.н., доц.,
ЛЕЛЕКА С. В., н.с, ПУЛИНЕЦ И. В., асп., ЛАЗАРЕВ Т. В., асп.**
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБЖИГА УГЛЕГРАФИТОВЫХ ЗАГОТОВОК

С использованием экспериментальных данных и численного моделирования камеры обжиговой печи разработана модернизированная конструкция печи, позволяющая существенно уменьшить неравномерность температурного поля по заготовкам. Разработана упрощенная методика для прогноза технологических параметров передела обжига «зеленых» заготовок в зависимости от графика изменения температуры дымовых газов под сводом печи.

Ключевые слова: обжиговая печь, «зеленая» заготовка, математическая модель, численное моделирование, температурное поле, модернизированная конструкция.

Постановка задачи

Обжиг является одной из важнейших технологических операций, в процессе которого происходит формирование физических свойств углеграфитовых материалов различного назначения. Обожженные материалы становятся устойчивыми к механическим воздействиям, увеличивается их теплопроводность, электропроводность и термоустойчивость, благодаря которым углеродные материалы получили широкое применение в различных отраслях промышленности [1].

В мировой практике производства обожженной электродной продукции наиболее распространены многокамерные закрытые печи типа Ридгаммера. За многие годы эксплуатации они претерпели значительные конструктивные изменения, направленные в основном на уменьшение выхода бракованных изделий [2].

Основными причинами выхода бракованных изделий являются: низкое качество наполнителя и связующего; выход некачественных заготовок на переделе прессования; нарушение технологических режимов при обжиге по скорости нагрева заготовок в интервале температур интенсивного газовыделения, по уровню максимальных температур и неравномерности температурного поля в объеме заготовок. Поэтому задачи получения заданного качества углеграфитовых заготовок при их обжиге являются актуальными.

Целью исследования является повышение тепловых и энергетических показателей процесса обжига электродных заготовок в многокамерных печах, за счет разработки новых методов усовершенствования технологического регламента и конструкции действующих печей.

Экспериментальные исследования

Задачи экспериментальных исследований термического режима обжига «зеленых» заготовок в

многокамерных печах:

- определение уровня температур в заготовках и газовых каналах на протяжении всего процесса;
- оценка скоростей роста минимальной, максимальной и среднеобъемной температур в заготовках;
- определение перепада температур в заготовках и по камере в целом;
- сопоставление уровней температур под сводом с достигаемыми температурами в пересыпке и заготовках;
- анализ теплового состояния процесса обжига в целом.

Данные натурных экспериментов также используются для проверки численной модели теплового состояния и газодинамики камеры обжиговой печи и задания граничных условий при выполнении тепловых расчетов.

Математическая модель газодинамики и теплообмена при обжиге углеграфитовых заготовок в печах Ридгаммера

Разработка численной модели камеры обжиговой печи включает такие этапы: математическую формулировку задачи, построение твердотельной модели камеры печи с выполнением ее дискретизации и задание условий однозначности.

Математическая формулировка задачи гидродинамики и теплообмена в камере печи Ридгаммера основывается на уравнении энергии, системе уравнений Навье-Стокса для сжимаемой жидкости и уравнениях кинетической турбулентной энергии и ее относительной скорости диссипации ($k - \omega$ модель турбулентности) [3]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}h) = \nabla \cdot \left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \eta_t \right) \nabla h \right) + E(X); \\ \rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial \tau} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right] = -\nabla P + \nabla \cdot \left((\eta + \eta_t) \left(\nabla \cdot \mathbf{V} + (\nabla \cdot \mathbf{V})^T - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{V} I \right) \right) + \rho \mathbf{g}; \\ \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0; \\ \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}k) = \nabla \cdot \left(\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + G_k - Y_k; \\ \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}\omega) = \nabla \cdot \left(\left(\eta + \frac{\eta_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right) + G_\omega - Y_\omega, \end{cases} \quad (1)$$

где τ – время, с; ρ – плотность, кг/м³; $h = \int_0^T c_p(T) dT$ – массовая энтальпия, Дж/кг; T – абсолютная температура, К; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ – оператор Гамильтона; $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)^T$ – вектор скорости, м/с; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); c_p – массовая изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); $\eta_t = \alpha^* \frac{k}{\omega}$ – коэффициент турбулентной вязкости, Па·с; p – давление, Па; η – динамическая вязкость, Па·с; \mathbf{g} – вектор ускорения свободного падения, м/с²; k – турбулентная энергия, м²/с²; ω – относительная скорость диссипации турбулентной энергии, 1/с; $G_k = \eta_t \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right)$; $G_\omega = \frac{\alpha \omega}{k} G_k$; $\sigma_k, \sigma_\omega, Y_k, Y_\omega, \alpha, \alpha^*$ – параметры $k - \omega$ модели¹; $X(x, y, z) \in R^3$ – система декартовых координат, м.

Для твердых элементов конструкции рассматривается только уравнение энергии (первое в системе (1)) без учета конвективных членов и турбулентной вязкости η_t .

Начальные условия:

$$\begin{cases} T(X) = T_0; \\ \mathbf{V}(X) = 0; \\ k(X) = 1; \\ \omega(X) = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Граничные условия:

– на входе в огневой канал

$$\begin{cases} T = T_{ex}; \\ G_{ex} = G_{\theta}; \end{cases} \quad (3)$$

– на выходе из камеры:

$$\begin{cases} \mathbf{n} \cdot \nabla T = 0; \\ p = 0; \end{cases} \quad (4)$$

– на границах контакта дымовые газы–твердое тело

$$\begin{cases} \mathbf{V} = 0; \\ \tau_t = \mathbf{n} \cdot (\eta \mathbf{V}), \end{cases} \quad (5)$$

где τ_t – тангенциальное напряжение, Па;

– на границах контакта твердых тел:

$$\begin{cases} \{T\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где $\{T\} = T^+ - T^-$; $\{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = \mathbf{n}^+ \cdot \mathbf{q}^+ - \mathbf{n}^- \cdot \mathbf{q}^-$; $\mathbf{q} = -\lambda(T)\nabla T$ – вектор плотности теплового потока, Вт/м²;

– на границах контакта с внешней средой:

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda(T)\nabla T) = \alpha_{ef}(T)(T - T_{oc}), \quad (7)$$

где α_{ef} – эффективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T_{oc} – температура окружающей среды, К.

Методика численного решения задачи (1–7) основывается на методе конечных объемов [4,5].

Численное моделирование теплового состояния обжиговой печи

С помощью разработанной численной модели газодинамики и теплового состояния многокамерной печи проведен численный анализ действующей конструкции камеры обжиговой печи. Результаты сопоставления численного эксперимента по среднему уровню температур в заготовках с данными натурального эксперимента представлены на рис. 1.

Результаты расчетов полей температур в заготовках (рис. 1) согласуются с экспериментальными данными, что обосновывает применение разработанной численной модели теплообмена и газодинамики камеры обжиговой печи с целью отработки рациональных технических решений и соответствующих температурных регламентов ведения процесса обжига в многокамерных печах.

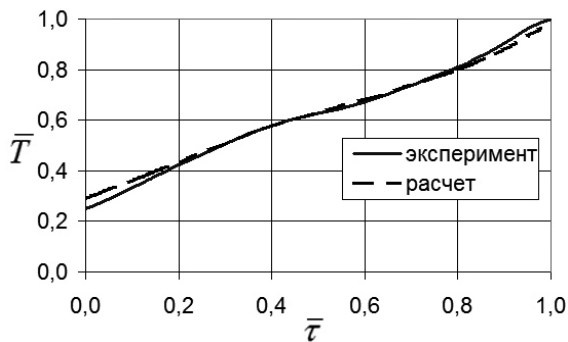
На основании проведенного анализа экспериментальных данных и результатов численного моделирования теплового состояния действующей конструкции обжиговой печи разработаны комплексные технические решения по ее модернизации, включающие в себя измененную схему загрузки заготовок, геометрию свода и муфельных каналов.

Сопоставление данных численного анализа теплового состояния действующей и модернизированной конструкций печи приведены на рис. 2.

Анализ полученных данных показывает, что предложенная комплексная модернизация позволяет существенно уменьшить неравномерность температурного поля по заготовкам и, следовательно, положительно повлиять на качество конечного продукта – углеграфитовой электродной продукции. Поэтому основным источником энергосбережения при обжиге прессованных заготовок в многокамерных печах является уменьшение бракованных изделий на выходе из печи.

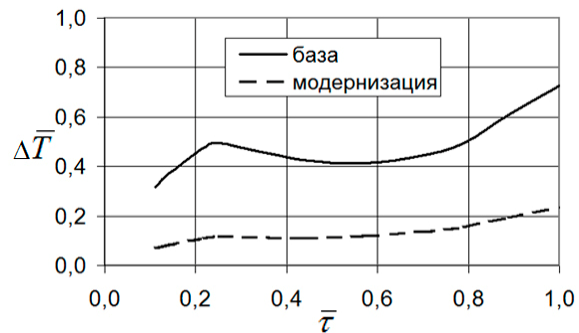
Упрощенная методика прогноза технологических параметров передела обжига зеленых заготовок

Особенно важными данными при разработке рациональных регламентов обжига зеленых заготовок в многокамерных печах являются данные о прогнозе значений температур заготовок с учетом фазы их интенсивного газовыделения в зависимости от наперед заданного графика изменения во времени температуры дымовых газов под сводом, загрузки камеры, скорости угара пересыпки и заготовок и т.д. Эти данные можно получить из результатов математического моделирования процесса обжига с помощью разработанных численных моделей. Однако такой путь является достаточно сложным для применения на промышленных предприятиях. Поэтому представляет значительный практический интерес разработка упрощенной методики, которая основывается на данных, полученных из натурального и численного экспериментов, выполненных однократно для конкретной конструкции печи.



$\bar{\tau} = \tau / \tau_{\max}$ – безразмерное время; $\bar{T} = T / T_{\max}$ – безразмерная температура; τ , T – текущее время (с) и температура (К); τ_{\max} , T_{\max} – продолжительность обжига и максимальная средняя температура заготовок

Рис. 1 – Сопоставление результатов расчета с данными эксперимента



$\Delta \bar{T} = \Delta T / \Delta T_{\max}$ – безразмерный температурный перепад в заготовках; ΔT – текущий перепад температур в заготовках, К; ΔT_{\max} – максимальный температурный перепад по заготовкам, К

Рис. 2 – Сравнение результатов расчетов действующей и модернизированной конструкций печи

Такая методика была построена на уравнениях результирующего теплового баланса между теплотой греющих дымовых газов и аккумулированной теплотой пересыпки и заготовок для одной камеры многокамерной печи:

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{k=2}^M \bar{\alpha}_{\text{эф.газ-загр}} \left(\bar{T}_{\text{газ-свод}} - \frac{\bar{m}_{\text{пер}} \bar{T}_{\text{пер}} + \bar{m}_{\text{заг}} \bar{T}_{\text{заг}}}{\bar{m}_{\text{пер}} + \bar{m}_{\text{заг}}} \right) S_{\text{газ-загр}} (\tau_k - \tau_{k-1}) = \\ = \sum_{k=2}^M \left[\bar{m}_{\text{пер}} \bar{c}_{\text{пер}} (T_{\text{пер}}^k - T_{\text{пер}}^{k-1}) + \bar{m}_{\text{заг}} \bar{c}_{\text{заг}} (T_{\text{заг}}^k - T_{\text{заг}}^{k-1}) \right] \\ \sum_{k=2}^M \frac{(\bar{T}_{\text{пер}} - \bar{T}_{\text{заг}}) S_{\text{заг}}}{\bar{r}_{\text{пер-заг}}} (\tau_k - \tau_{k-1}) = \sum_{k=2}^M \bar{m}_{\text{заг}} \bar{c}_{\text{заг}} (T_{\text{заг}}^k - T_{\text{заг}}^{k-1}), \end{aligned} \right. \quad (8)$$

где k – номер шага интегрирования по времени; M – число шагов интегрирования, на которое разбивается весь период обжига; $\bar{\alpha}_{\text{эф.газ-загр}} = K \frac{\alpha_{\text{эф.газ-загр}}^k + \alpha_{\text{эф.газ-загр}}^{k-1}}{2}$ – средний на временном интервале $(\tau_k - \tau_{k-1})$ коэффициент теплоотдачи между газом и загрузкой печи (пересыпка + заготовки),

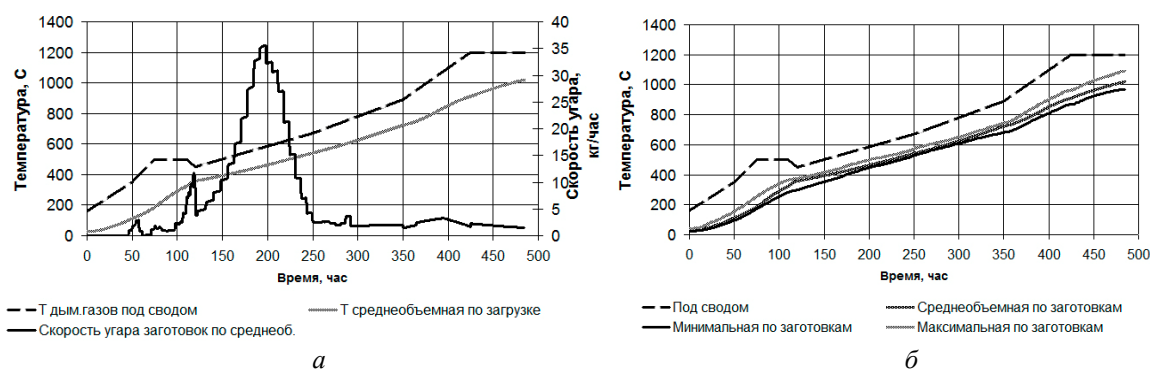
Вт/(м²·К); K – коэффициент формы камеры; $\bar{T} = \frac{T^k + T^{k-1}}{2}$ – средняя на интервале ($\tau_k - \tau_{k-1}$) температура дымовых газов, пересыпки и заготовок, К; $S_{\text{газ-загр}}$ – площадь теплообмена между дымовыми газами и загрузкой печи, м²; τ – время, с; $\bar{m} = \frac{m(\tau^k) + m(\tau^{k-1})}{2}$ – средняя на интервале ($\tau_k - \tau_{k-1}$) масса пересыпки и заготовок, кг; $\bar{c} = \frac{c(T^k) + c(T^{k-1})}{2}$ – средняя на интервале ($\tau_k - \tau_{k-1}$) массовая теплоемкость пересыпки и заготовок, Дж/(кг·К); $\bar{r}_{\text{пер-заг}} = \frac{r_{\text{пер-заг}}^k + r_{\text{пер-заг}}^{k-1}}{2}$ – контактное термическое сопротивление пересыпка – заготовки, (К·м²)/Вт; $S_{\text{заг}}$ – поверхность заготовок, м².

Из решения системы уравнений (8) размерностью $2 \times (M - 1)^2$ определяются температуры заготовок и пересыпки на текущий момент времени обжига. Значения величин $\bar{\alpha}_{\text{эф.газ-загр}}$ и $\bar{r}_{\text{пер-заг}}$ определяются по данным натурного и численного экспериментов. Причем $\bar{\alpha}_{\text{эф.газ-загр}}$ является характеристикой конструктивных особенностей камеры печи, а $\bar{r}_{\text{пер-заг}}$ – загрузки камеры печи.

Предложенная методика, реализованная в соответствующем программном обеспечении, позволяет определять (прогнозировать) следующие технологические параметры камеры многокамерной печи:

- режим обжига по заданной функциональной зависимости температуры дымовых газов под сводом $\bar{T}_{\text{газ-свод}} = f_T(\tau)$;
- рациональную загрузку камеры по заданным массе пересыпки и заготовок, поверхности контакта между пересыпкой и заготовками;
- угар заготовок и пересыпки по заданным функциональным зависимостям потери их массы $\Delta m = f_m(\tau)$.

Пример прогноза технологических параметров передела обжига «зелених» заготовок с использованием разработанной методики показан на рис. 3.



а – по общей загрузке; б – по заготовкам

Рис. 3 – Результаты прогноза режимных параметров обжига заготовок в многокамерной печи

Выводы

Предложенная комплексная модернизация позволяет существенно уменьшить неравномерность температурного поля по заготовкам и, следовательно, положительно повлиять на качество конечного продукта – углеродистой электродной продукции.

Разработана и внедрена в производство комплексная расчетно-экспериментальная методика, используемая для разработки рациональных режимов эксплуатации печного оборудования и оценки эффективности технических решений по энергосбережению в электродном производстве.

Список использованной литературы

1. Санников А.К., Сомов А.Б., Ключников В.В. и др. Производство электродной продукции / А.К. Санников – М. : Металлургия, 1985. – 128с.
2. Чалых Е. Ф. Оборудование электродных заводов / Е. Ф. Чалых. – М. : Металлургия, 1990 – 238 с.
3. Wilcox D. C. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models / D. C. Wilcox // AIAA Journal. –1988. – Vol. 26, No. 11. – P. 1299–1310.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Патанкар С. ; пер. с англ. В. Д. Виленского. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 153 с.
5. Панов С. М., Карвацкий А. Я., Шилович І. Л., Лелека С.В., Пулінець І.В. Математичне моделювання складного теплообміну повітряних регенераторів [Текст] : монографія. – К. : НТУУ «КПІ», 2011. – 103 с.

The revised construction of kiln is developed with use of the experimental data and numerical simulation of chamber of calcining kiln, which makes it possible to decrease irregularity of temperature field in material blanks. The simplified method is developed for prediction of process variables redistribution of roasting «green» blanks depending of the characteristic curve of temperature of flue gases under the furnace roof.

Keywords: calcining kiln, «green» blank, mathematical model, numerical simulation, temperature field, revised construction.

Поступила в редакцию 01 сентября 2011 года

УДК 669.2.02/.09

ЕРШОВ В. А.¹, к.т.н., доц., **БОГДАНОВ Ю. В.¹**, к.т.н., докторант, **МЕХНИН А. О.²**, менеджер, **КОНДРАТЬЕВ В. В.³**, к.т.н., нач.отд. инновационных технологий

¹Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет, г. Иркутск

²ОАО «Кандалакшский алюминиевый завод», г. Кандалакша

³Физико-технический институт Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета, г. Иркутск

ТЕХНИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ С САМООБЖИГАЮЩИМСЯ АНОДОМ И БОКОВЫМ ТОКОПРОВОДОМ В РЕЖИМЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПОДАЧИ ГЛИНОЗЕМА

Приведены результаты исследований технической и экологической эффективности внедрения автоматизированной подачи глинозема (АПП) на электролизерах Содерберга с боковым токопроводом. Разработаны технические решения по оптимизации технологических параметров работы электролизеров Содерберга с боковым токопроводом в режиме АПП.

Ключевые слова: автоматическая подача глинозема, электролизер, электролит, боковой токопровод, боковой подвод тока.

Постановка задачи

Разработанный для электролизеров с обожженными анодами способ автоматической подачи глинозема, полностью оправдал надежды разработчиков: возможность оперативного управления концентрацией глинозема в электролите с поддержанием ее в заданных оптимальных пределах привела к стабилизации энергетического режима электролизеров, состава электролита, формы рабочего пространства, снижению выбросов и, как следствие, повышению экологических и технико-экономических показателей.

Применение данного способа на электролизерах Содерберга имеет ряд проблем, вызывающих труд

© Ершов В. А., Богданов Ю. В., Мехнин А. О., Кондратьев В. В., 2011.