

8. T.H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, J. Zhu A New $k - \varepsilon$ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation// *Computers Fluids*. – 1995. – 24(3). – P.227–238.
9. Карвацький А.Я., Шилович І.Л., Лелека С.В. Застосування методу граничних елементів для розв'язання задач теорії статичної термопружності// Наукові вісті НТУУ “КПІ”. –2001. –№3. –С.64–71.
10. П. Бенерджи, Р. Баттерфилд Методы граничных элементов в прикладных науках/ Пер. с англ. - М.: Мир, 1984. - 494с.
11. С.Н.Ахмедов, В.В.Тихомиров, В.А.Козлов, Е.Н.Панов, А.Я.Карвацкий Исследование прочностных характеристик катодного кожуха для мощных алюминиевых электролизеров //Цветные металлы. – 2006. – № 11. – С. 39–42.

The multilevel complex method of the higt-tamperature reseach of the energy-intensive industrial aggregates at the operating regime is developed. The numerical models of the physical fields in the higt-tamperature industrial aggregates are developed. The results of the numerical simulation of physical fields are received. The power-saving recommendations are develop and received their introduction.

Keywords: aluminium electrolyser, furnace of graphitization, temperature field, numerical model.

Поступила в редакцию 12 сентября 2011 года

УДК 669.713

**КАРВАЦКИЙ А. Я., д.т.н., проф., ПАНОВ Е. Н., д.т.н., проф.,
ДАНИЛЕНКО С. В., с.н.с., БОЖЕНКО М. Ф., к.т.н., доц.**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ПОДИНЫ ПРИ ПЛАМЕННОМ ОБЖИГЕ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ

Приведены математическая формулировка задачи теплового состояния алюминиевого электролизера при пламенном обжиге подины, представленная нестационарным уравнением теплопроводности с внутренними источниками теплоты, а также методика численного решения этого уравнения, базирующаяся на методе конечных элементов. Разработана численная модель электролизера С-175, для которой по разработанной методике определены температурные поля подины при пламенном обжиге. Показано, что результаты численных расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Рекомендовано использовать разработанную методику для прогнозирования температурных полей подины при разработке научно-обоснованных регламентов пламенного обжига электролизеров с обожженными анодами различной мощности.

Ключевые слова: алюминиевый электролизер, подина, обжиг, температурное поле, темп нагрева, теплота, численная модель.

Постановка задачи

Одной из технологических операций подготовки алюминиевых электролизеров к пуску является обжиг, к основным задачам которого относятся коксование набивных углеродистых межблочных и периферийных швов подины, прогрев катодного и анодного устройств до температур, близких к эксплуатационным [1].

Из известных способов обжига (внутренними и внешними источниками теплоты, комбинированном) в последнее время предпочтение отдают использованию для этого процесса внешних источников теплоты, в частности, пламенному обжигу продуктами сгорания жидкого или газообразного топлива. При этом способе, как отмечается в работе [2], возможно эффективное управление температурным режимом, а это способствует достижению распределения температур, близкого к однородному по всей ванне, а также

обеспечивается однородная скорость подъема температур, улучшенное распределение температуры в катоде и минимум термических напряжений.

Основными показателями обжига являются достижение в конце процесса требуемых температур поверхности подины не менее 800 °С, обеспечение равномерности ее прогрева и темпа нагрева в периоде образования полукокса около 7 – 10 °С/ч, полного коксования межблочных швов и частичного – периферийных (не менее половины их глубины).

Современные промышленные жидкотопливные обжиговые установки, применяемые на алюминиевых заводах, предусматривают установку на поверхности подины четырех хромель-алюмелевых термопар, позволяющих контролировать текущую температуру подины, скорость ее изменения и равномерность нагрева подины изменением расхода топлива соответствующими форсунками. Однако измерение температуры поверхности подины является необходимым условием, но не достаточным, поскольку здесь не учитывается изменение среднеобъемных температур межблочных и периферийных швов, по значению которых можно отслеживать процессы их коксования. Среднеобъемные температуры могут быть определены при наличии температурных полей в среднем сечении подины или под угольными блоками. Экспериментальные исследования температурных полей при обжиге каждого электролизера связаны с существенными затратами, поэтому задачи подобного рода предпочтительнее решать методами математического моделирования.

Математическому моделированию теплового состояния электролизера в процессе пламенного обжига посвящено ограниченное количество работ [3–6], в которых в основном рассматриваются двумерные математические постановки на базе нестационарного неоднородного уравнения теплопроводности для поперечного вертикального сечения электролизера или плана подины (горизонтальное сечение по глубине подины). Методики численного решения этих задач обычно основываются на различных вариантах метода конечных разностей.

Целью статьи является разработка методики и программного обеспечения для численного моделирования трехмерных температурных полей подины при пламенном обжиге электролизеров.

Математическая формулировка задачи. Методика численного решения

Математическая формулировка теплового состояния алюминиевого электролизера при пламенном обжиге его подины может быть представлена нестационарным уравнением теплопроводности с внутренними источниками теплоты вида [3]:

$$[c_p(t)\rho(t)]_i \frac{\partial t}{\partial \tau} = \nabla \cdot [\lambda_i(t)\nabla t(X)] + q_{vi}, \tau > 0, \quad (1)$$

где c_p – массовая изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; t – температура, °С; τ – время, с; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ – оператор Гамильтона; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); $X(x, y, z) \in R^3$ – декартовы координаты, м; $i = \overline{1, M}$ – индекс элемента конструкции алюминиевого электролизера; M – количество элементов конструкции; q_{vi} – объемная плотность внутреннего источника теплоты, выделяющегося в пространстве между анодным узлом и подиной, Вт/м³.

Величина объемной плотности внутреннего источника теплоты определяется из функционального соотношения:

$$q_{vi} = f[Q_n^p, B(\tau), \eta_{н.т}, V_i],$$

где Q_n^p – низшая теплота сгорания топлива на рабочую массу, Дж/кг; B – массовый расход топлива, кг/с; $\eta_{н.т}$ – коэффициент использования топлива; V_i – объем пространства между анодным узлом и подиной, м³.

Начальные условия:

$$t|_{\tau=0} = t(X), \quad X(x, y, z) \in R^3. \quad (2)$$

Граничные условия (ГУ) при $\tau > 0$:
на осях симметрии (адиабатные ГУ)

$$\mathbf{n} \cdot \nabla t = 0, \quad (3)$$

где \mathbf{n} – внешняя нормаль к граничной поверхности;

– на границах контакта между элементами конструкции алюминиевого электролизера (ГУ 4-го рода)

$$\begin{cases} \{t\} = 0; \\ \{\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}\} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

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 окружающей средой (ГУ 3-го рода)

$$\mathbf{n} \cdot (-\lambda(t)\nabla t) = \alpha_{\text{эф}}(t)(t - t_{\text{окр.ср}}), \quad (5)$$

где $\alpha_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи, учитывающий теплообмен конвекцией и излучением, Вт/(м²·К); $t_{\text{окр.ср}}$ – температура окружающей среды, °С.

Методика численного решения уравнения (1) с начальными и граничными условиями (2) – (5) базируется на методе конечных элементов (МКЭ) [7–11], в соответствии с которым расчетная область каждого из элементов электролизера разбивается на элементы, в узлах которых температуры вычисляются по формуле:

$$\{t^{k+1}\} = \{t^k\} + \{\delta t^{k+1}\},$$

где k – номер итерации; δt – поправка на температуру.

Для решения нелинейной нестационарной задачи изотропной теплопроводности применяли систему уравнений МКЭ, представленную в работах [12, 13]:

$$\sum_{e=1}^M \left([k_{\lambda}^{(e)}] \lambda^{(e)}(\hat{t}) + [k_{\alpha}^{(e)}] \alpha_{\text{эф}}(\hat{t}) \right) \{\hat{t}\} + [c^{(e)}] \left\{ \frac{\hat{H}^e(\hat{t}) - H^e(t)}{\Delta \tau} \right\} = - \sum_{e=1}^M \{f^{(e)}\} + O(\Delta \tau), \quad (6)$$

где M – число элементов; \hat{t} – температура на верхнем временном уровне, °С; $H(t)$ – энтальпия, Дж/м³; $[k_{\lambda}^{(e)}]$, $[k_{\alpha}^{(e)}]$ и $[c^{(e)}]$ – матрицы теплопроводности, внешнего конвективного теплообмена и теплоемкости, соответственно; $\{f^{(e)}\}$ – вектор свободных членов; $\Delta \tau$ – шаг интегрирования по времени, с.

Энтальпия вычисляется по формуле:

$$H(t) = \int_0^t c_p(t) \rho(t) dt.$$

Матрицы теплопроводности, внешнего конвективного теплообмена при $\lambda = \alpha = c_p \rho = 1$, теплоемкости, а также вектор свободных членов определяются по формулам [7]:

$$[k^{(e)}] = \int_V [B]^T [D] [B] dV + \int_S \alpha_{\text{эф}} [N]^T [N] dS; \quad (7)$$

$$[c^{(e)}] = \int_V c_p \rho [N]^T [N] dV; \quad (8)$$

$$\{f^{(e)}\} = - \int_V [N]^T q_V dV - \int_S \alpha_{\text{эф}} t_{\text{окр.ср}} [N]^T dS, \quad (9)$$

где V – объем конечного элемента, м³; S – поверхность конечного элемента, на которой заданы ГУ 3-го рода, м²; $[N]$ – вектор коэффициентов функций формы конечного элемента; $[B]$ – матрица производных функций формы по координатам; $[D]$ – матрица теплопроводности, в которой учитывается анизотропия свойств материала.

Выражения (7)–(9) записаны для случая граничных условий 3-го рода. В МКЭ граничные условия 4-го рода и условия отсутствия теплообмена на внешних границах (адиабатные условия) или на осях симметрии (3) реализуются автоматически, т.е. их специально задавать не требуется.

В качестве единицы дискретизации расчетной области выбрали линейный четырехгранный конечный элемент – тетраэдр [7, 8], который позволяет аналитически определять все его соотношения (7) – (9).

После линеаризации уравнения (6) по методу Ньютона [11–13] была получена следующая система уравнений относительно поправки на температуру δt :

$$\sum_{i=1}^M \left([k_{\lambda}^{(e)}] \left(\frac{\partial \lambda^{(e)}(t^k)}{\partial t} \right) \{t^k\} + \lambda^{(e)}(t^k) \right) + [k_{\alpha}^{(e)}] \alpha_{\text{эф}} + [c^{(e)}] \left\{ \frac{c_p^{(e)}(t^k) \rho^{(e)}(t^k)}{\Delta \tau} \right\} \{\delta t^{k+1}\} = - \sum_{e=1}^M \{f^{(e)}\} - \sum_{e=1}^M \left([k_{\lambda}^{(e)}] \lambda^{(e)}(t^k) + [k_{\alpha}^{(e)}] \alpha_{\text{эф}} \right) \{t^k\} + [c^{(e)}] \left\{ \frac{H^e(t^{k+1}) - H^e(t^k)}{\Delta \tau} \right\}. \quad (10)$$

Система линеаризованных уравнений (10) решается методом Гаусса с учетом ленточной структуры матрицы системы линейных алгебраических уравнений [14–16].

Критерием получения численного решения исходной задачи является выполнение условия:

$$|\delta t_i^{k+1}| \leq \varepsilon_i, i = 1, N,$$

где ε_i – заданная точность расчета поля температур, K ; N – количество узлов в расчетной области.

Программное обеспечение (ПО), в котором реализуется численная методика решения поставленной задачи включает в себя следующие компоненты: Препроцессор, Решатель и Программу Просмотра. В качестве препроцессорной части для построения конструктивно сложных объектов применяются известные CAD – системы [17], в которых строится твердотельная модель алюминиевого электролизера, включающая в себя катодный и анодный узлы, а также катодный кожух, далее модель экспортируется в меш-генератор (например, Open Source Software – GTS, ENGRID, NETGEN), после чего дискретная модель записывается в виде текстового файла. Решатель – это ПО авторской разработки [13], код которого написан на языке программирования высокого уровня Fortran (90, 95) и в котором непосредственно реализуется описанная выше методика.

В Решателе выполняется чтение текстового файла ранее записанной дискретной модели алюминиевого электролизера, присоединение начальных и граничных условий, формируется задание на выполнение расчета, выполняется решение задачи в соответствии с разработанным алгоритмом и записываются результаты расчетов в виде текстового файла в формате выбранной программы просмотра. В качестве программы просмотра используется программа Tecplot.

Результаты численных экспериментов

Проверку работоспособности разработанной модели осуществляли сравнением полученных численных результатов с экспериментальными исследованиями пламенного обжига электролизера с обожженными анодами С-175, где применялась промышленная жидкотопливная установка «HOOTWORK» [18]. Твёрдотельная модель электролизера представлена на рис. 1.

Исходные данные к численным расчетам:

- количество этапов обжига и их длительность [18];
- расходы дизельного топлива на всех этапах обжига – см. табл. 1;
- физико-химические свойства топлива и набивной массы [1, 19, 20];
- теплофизические свойства конструкционных материалов алюминиевого электролизера [1, 20, 21];
- условия внешнего теплообмена (температура окружающей среды и коэффициенты теплоотдачи) [1, 20].

Таблица 1 – Расходы топлива при обжиге электролизера С-175

Номер этапа	Длительность этапа, ч	Расход дизельного топлива, л/ч
I	6	45
II	26	35
III	22	50
IV	18	70

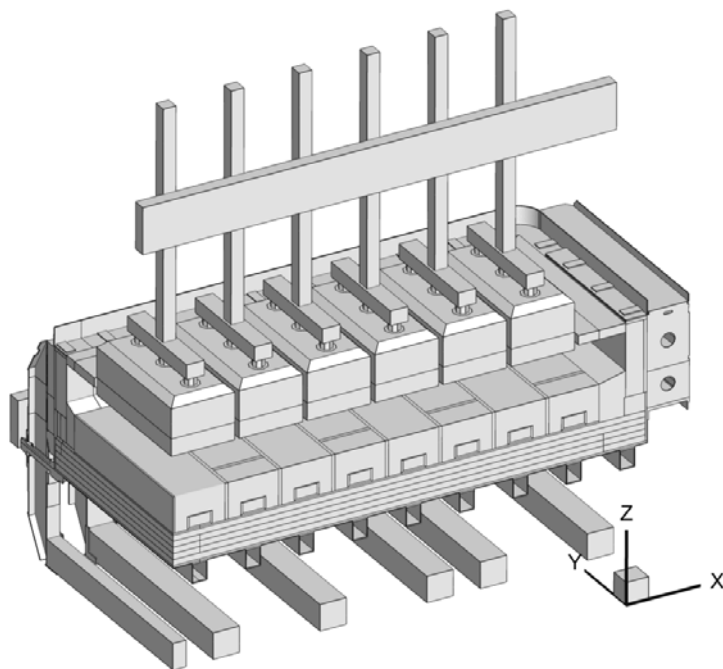


Рис. 1 – Твердотельная модель электролизера С-175

Результатом выполненных расчетов пламенного обжига являются:

- температурные поля всех элементов конструкции алюминиевого электролизера в различные периоды обжига;
- средняя скорость нагрева подины;
- средние значения температур по поверхностям подины и периферийных швов;
- среднеобъемные температуры подины, межблочных и периферийных швов;
- основные критерии качества обжига: конечные температуры и глубина коксования межблочных и периферийных швов; равномерность нагрева подины и т.д.

Результаты расчетов в виде полей температур на конец обжига представлены на рис. 2, а по среднеинтегральным значениям характерных температур подины – на рис. 3.

Анализ численных расчетов показывает, что в конце обжига электролизера С-175 получены следующие показатели:

- средние поверхностные температуры подины – 775 °С (экспериментальное значение – 806 °С [18]) и периферийного шва – 450 °С;
- средние объемные температуры подины – 630 °С (экспериментальное значение – 665 °С [18]) и периферийного шва – 365 °С;
- межблочные швы скоксовались практически полностью по всей глубине, т.к. их среднеобъемная температура лежит в пределах температур образования полукокса (350–400 °С), а периферийные – примерно наполовину их глубины (см. рис. 4).
- средние темпы нагрева поверхности подины по этапам обжига: на I-м этапе – 38,9 К/ч; на II-м – 8,6 К/ч; на III-м – 7,7 К/ч; на IV – 10,1 К/ч.
- коэффициент неравномерности температурного поля [1] составляет $K_t = 0,02$.

Сопоставление численных расчетов с экспериментом по температурной зависимости поверхности подины от времени обжига (рис. 3) показывает, что максимальные отличия между этими данными составляют: на I-м этапе обжига – 24,2 %; на II-м этапе – 1,5 %; на III-м этапе – 6,5 %; на IV-м этапе – 3,7 %.

Выводы

1. Разработана математическая модель пламенного обжига алюминиевого электролизера с обожженными анодами и методика численного решения поставленной задачи на основе МКЭ.

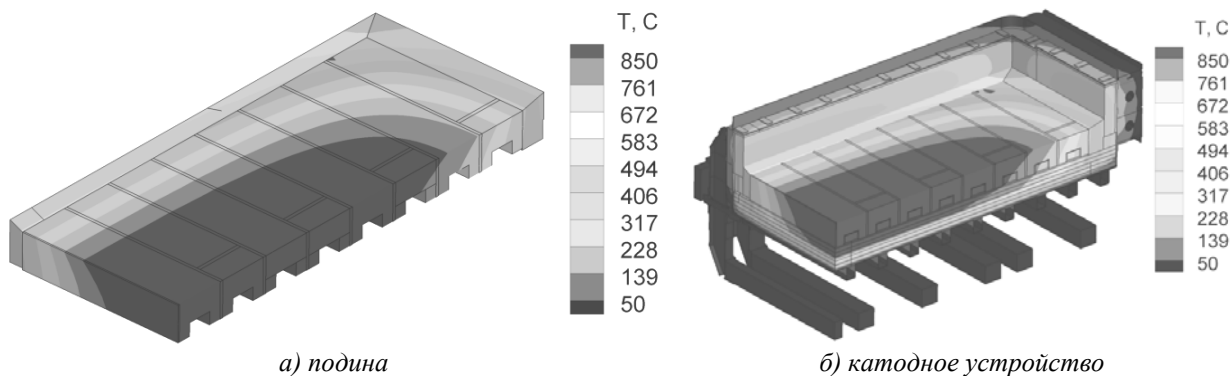
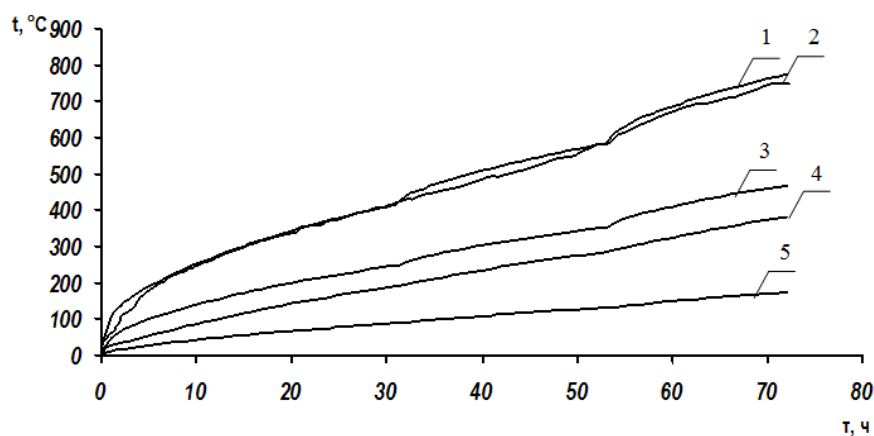


Рис. 2 – Температурные поля электролизера С-175 на конец обжига



1,2,3 – межблочные швы (1,2 поверхность: 1 – расчет, 2 – эксперимент; 3 – среднеобъемная);
4,5 – периферийные швы (4 – поверхность; 5 – среднеобъемная)

Рис. 3 – Зависимости расчетных температур подины от времени при пламенном обжиге электролизера С-175

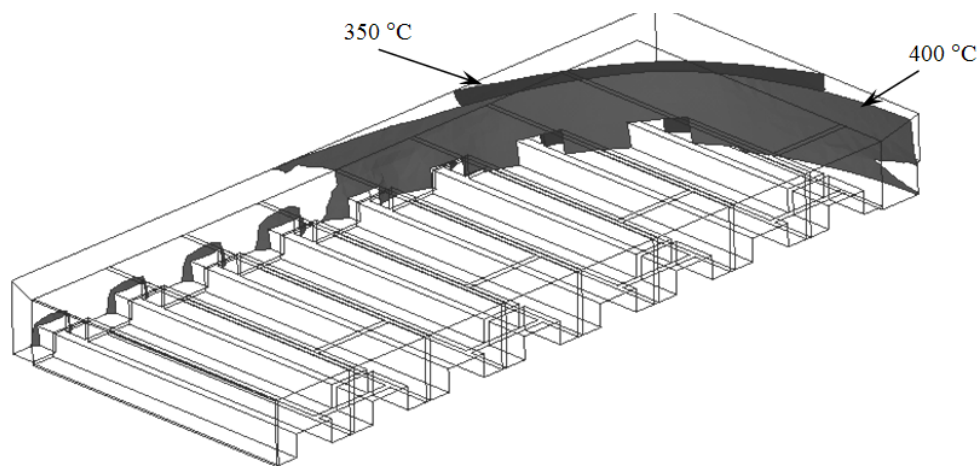


Рис. 4 – Расположение изотерм образования полукокса в подине на конец обжига алюминиевого электролизера С-175

2. Выполненные по разработанной методике расчеты температурных полей одного из электролизеров при пламенном обжиге жидкотопливной установкой показал, что полученные результаты удовлетво-

рительно согласуются с экспериментом, что позволяет рекомендовать эту методику для разработки научно-обоснованных регламентов пламенного обжига электролизеров с обожженными анодами. Регламенты обжига позволят учитывать особенности физико-химических свойств различных набивных масс (фаза интенсивного газовыделения), т. е. определенный темп нагрева в периоде образования полуккокса, а также требования основных критериев качества обжига: уровня конечных температур, глубины коксования межблочных и периферийных швов; равномерности нагрева подины.

Список использованной литературы

1. Громов Б.С. Обжиг и пуск алюминиевых электролизеров / Б.С. Громов, Е.Н. Панов, М.Ф. Боженко и др.; под общ. ред. Б.С.Громова. — М.: «Руда и металлы», 2001. — 336 с.
2. Сорлье М. Катоды в алюминиевом электролизере. 2 издание / М. Сорлье, Х.А. Ойя // Пер. с англ. П.В.Полякова. — Красноярск : Краснояр. гос. ун-т. 1997. — 460 с.
3. Злобин В.С. Моделирование обжига подины алюминиевых электролизеров / В.С.Злобин, В.А.Крюковский, Г.А. Потьлицын и др. // Цветные металлы. — 1990. — № 11. — С. 60—63.
4. Багаев Б.М. Оптимизация нагрева подины алюминиевого электролизера топочными газами / Б.М.Багаев, В.С. Злобин, В.Н. Тихомиров и др. // Цветные металлы. — 1997. — № 9. — С. 66—68.
5. Багаев Б.М. Влияние углеродистых материалов на формирование температурного поля подины / Б.М. Багаев, А.П.Багаева, В.С. Злобин и др. // Цветные металлы. — 2000. — № 2. — С. 56—59.
6. Захаров Н.В. Основы построения математической модели для анализа и выбора параметров обжига и пуска электролизера / Н.В. Захаров, В.Г. Харченко, А.В. Овчинников // Цветные металлы. — 1991. — № 2. — С. 37—40.
7. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд // Пер. с англ. А.А. Шестакова ; под ред. Б. Е. Победри. — М. : Мир, 1979. — 392 с.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич // Пер. с англ. ; под ред. Б. Е. Победри. — М. : Мир, 1975. — 541 с.
9. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс // Пер. с англ. В. И. Агошкова и др. ; под ред. Г. И. Марчука. — М. : Мир, 1977. — 349 с.
10. Норри Д. Введение в метод конечных элементов / Д. Норри, Ж. де Фриз // Пер. с англ. Г. В. Демидова, А. Л. Урванцева ; под ред. Г. И. Марчука. — М. : Мир, 1981. — 304 с.
11. Калиткин Н. Н. Численные методы : учеб. пособие / Н. Н. Калиткин ; под ред. А. А. Самарского. — М. : Наука, 1978. — 512 с.
12. Панов С. М. Числове моделювання теплоелектричного стану алюмінієвих електролізерів / С. М. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, І. В. Пулінець // Вісник НТУУ «КПІ» Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження : зб. наук. праць. — 2009. — №2(4). — С. 59—65.
13. Карвацький А. Я. Теплоелектричний та механічний стан високотемпературних енергоємних промислових агрегатів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.05.13 «Машини та апарати хімічних виробництв» / А. Я. Карвацький. — К., 2010. — 40 с.
14. Тьюарсон Р. Разреженные матрицы / Р. Тьюарсон // Пер. с англ. — М. : Мир, 1977. — 190 с.
15. Джордж А. Численное решение больших разреженных систем уравнений / А. Джордж, Дж. Лю // Пер. с англ. Х. Д. Икрамова. — М. : Мир, 1984. — 334 с.
16. Уилкинсон Р. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. Линейная алгебра / Р. Уилкинсон // Пер. с англ. ; под ред. Ю. И. Топчеева. — М. : Машиностроение, 1976. — 389 с.
17. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов и др.— СПб. : БХВ-Петербург, 2005. — 800 с.
18. Даниленко С.В. Температурні поля подини та оцінка енергетичної ефективності при полуменовому обпаленні електролізерів великої потужності / С.В. Даниленко, С.М. Панов, М.Ф. Боженко і ін. // Вісник НТУУ «КПІ» Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. — 2010. — № 2(6). — С. 27—33.
19. Шилович Т. Б. Теплові режими підготовки та введення в експлуатацію катодних пристроїв алюмінієвих електролізерів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика» / Т. Б. Шилович. — К., 2004. — 20 с.
20. Физические величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева. — М. : Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
21. Тепловые процессы в электролизерах и миксерах алюминиевого производства / Е.Н. Панов, Г.Н. Васильченко, С.В. Даниленко и др.; под общ. ред. Б.С. Громова. — М.: «Руда и металлы», 1998. — 256 с.

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