

– диэлектрическая проницаемость –  $7 \dots 13$ ;  
– диэлектрические потери  $\operatorname{tg} \delta$  при  $f = 1$  МГц при  $20^\circ\text{C}$  –  $7 \cdot 10^{-4}$ ;

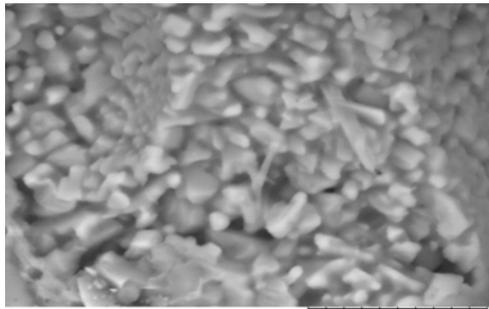


Рис. 4. Электронно-микроскопический снимок синтетического волластонита, полученного путем самораспространяющейся кристаллизации пеносиликата на основе ЗШО от сжигания бурых углей КАТЭКа

– электрическая прочность –  $30 \dots 50$  кВ/мм;  
– материал не содержит вредных примесей железа, марганца, титана;  
– не смачивается расплавом цветных металлов;  
– хорошо обрабатывается резанием.

Расчет экономической эффективности переработки 100 тыс. т ЗШО в год показал, что рентабельность производства составляет 34,9 %, срок окупаемости капитальных затрат – 11 месяцев.

#### Библиографическая ссылка

1. Фундаментальные основы комплексной переработки углей КАТЭКа для получения энергии, синтез-газа и новых материалов с заданными свойствами / В. Ф. Шабанов, Б. Н. Кузнецов, М. Л. Щипко и др. Новосибирск : изд-во Сиб. отд-ния Рос. акад. наук, 2005.

I. V. Pavlov, V. F. Pavlov, V. F. Shabanov

### ACADEMIC AND RESEARCH PRINCIPLES OF OBTAINING OF SYNTHETICAL WOLLASTONITE PRODUCED OF KATEK BROWN COALS REFUSE BURNOUT

*In the article we consider a new method of obtaining wollastonite by means of directed crystallization of X-ray amorphous foamed silicate obtained by cooling in water the iron-free silicate moiety of a melt of brown coals refuse burnout.*

*Keywords: fly ash wastes, reduction, melting, self-propagating crystallization.*

© Павлов И. В., Павлов В. Ф., Шабанов В. Ф., 2010

УДК 621.365.41

А. А. Темеров, В. Н. Тимофеев, Д. А. Михайлов

### ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МИКСЕРОВ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ\*

*Рассмотрены причины низкой эксплуатационной надежности нагревательных элементов миксеров сопротивления для приготовления сплавов алюминия. На основе статистических данных и результатов численного, физического и натурного экспериментов предложены конструктивные решения для повышения эксплуатационной надежности и энергетической эффективности систем электронагрева.*

*Ключевые слова: миксер сопротивления, система электронагрева, электронагреватель сопротивления, конечно-элементная математическая модель, температурное поле, тепловая мощность электронагревателя.*

В мировой алюминиевой промышленности Россия является одним из крупнейших потребителей новых технологий и нового оборудования для производства сплавов на основе алюминия, которые занимают лидирующее положение среди конструкционных материалов и

имеют хорошие перспективы на будущее, в связи с чем к технологическим возможностям электрических миксеров и дополнительного оборудования, предназначенного для производства качественного заготовительного алюминиевого литья, предъявляются все более высокие требова-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» (проект № 72-КФ «Разработка и организация производства высоконадежных электронагревательных систем для цветной металлургии»).

ния. Одним из основных узлов, определяющих качество алюминиевого сплава, а также надежность и энергетическую эффективность электрических миксеров сопротивления, является система электронагрева. В качестве основной задачи при разработке систем электронагрева новых конструкций для миксеров сопротивления выступает повышение надежности и энергетической эффективности наиболее ответственных элементов – электронагревателей сопротивления.

На большинстве отечественных предприятий электронагреватели сопротивления представлены подвесными ленточными и стержневыми нагревательными элементами, помещенными в защитные трубы или располагающимися над расплавом открыто. В нагревательных элементах такой конструкции в качестве токопроводящего элемента используется ленточный провод из высокоомных сплавов, например нихрома (X20H80, ХН70Ю, Х25Н20 и др.) [1].

В процессе эксплуатации подвесные ленточные нагревательные элементы подвергаются воздействию брызг алюминиевого сплава на этапе рафинирования расплава, в результате чего на них образуется слой оксидных отложений. В дальнейшем тепловое сопротивление между поверхностью расплава и нагревательными элементами возрастает, что ведет к повышению скорости коррозии нагревательных элементов, росту температуры и значительному снижению срока их эксплуатации.

Использование дорогостоящих нагревательных элементов на большинстве предприятий объединенной компании «РУСАЛ» практически не изменило ситуацию с выходом из строя электронагревателей.

На сегодняшний день в крупнотоннажных миксерах применяются электронагреватели, состоящие из подвесных стержневых нагревательных элементов и защитных труб. Наиболее распространенными являются трубчатые электронагреватели шведской фирмы Kanthal (рис. 1), состоящие из нагревательных элементов Kanthal Tubothal и защитных труб Kanthal APM (Fe – 22 %, Al – 6 %). Основным недостатком таких электронагревателей являются низкая механическая прочность и склонность к насыщению элементами материала трубы (N, K, Na, Cl, F, Cu, Ni, Mn и Mg). Анализ причин выхода их из строя установил, что защитные трубы наиболее склонны к газовой коррозии при поддержании рабочей температуры в диапазоне 850...900 °С, а к механической деформации – в

период перехода материала защитных труб через границу хладотвердости 850...870 °С [2; 3].

Одним из наиболее перспективных путей повышения надежности электронагревателя является применение в качестве материала проводников подвесных стержневых нагревательных элементов многокомпонентных сплавов, содержащих в своем составе Y, La, Ce, Zr, Ti, Si (GS23-5 и др.) [4; 5]. Повышенная химическая стойкость таких материалов к воздействию агрессивной газовой среды миксера обусловлена образованием пленки оксида алюминия  $Al_2O_3$  на поверхности проводника в процессе эксплуатации при температуре более 780 °С. Эта пленка замедляет развитие окислительных процессов в теле проводника, и его поперечное сечение, в отличие от проводника из нихрома, остается практически неизменным.

Описанное выше свойство многокомпонентных сплавов было использовано при создании конструкции нагревательного элемента с повышенной степенью надежности, разработанного сотрудниками ООО «НПЦ магнитной гидродинамики» для миксера сопротивления САМП-100 (рис. 2). Высокая эксплуатационная надежность этого элемента была подтверждена в ходе эксплуатации опытно-промышленного образца, установленного на миксере САМП-100 (агрегат № 10 ЛО-3 ООО «КрАЗ»).

Анализ условий эксплуатации электронагревателей на ООО «РУСАЛ–Красноярск», ООО «РУСАЛ–Саяногорск» и ООО «РУСАЛ–Новокузнецк» с 2008 по 2010 гг. показал, что применяемые для защиты нагревательных элементов металлические трубы в наибольшей мере склонны к деформации и зарастанию при приготовлении алюминиевых сплавов с использованием флюсов.

С целью повышения газовой и коррозионной стойкости, а также для решения задачи повышения энергетической эффективности системы электронагрева требовалось:

- снизить температуру на нагревательных элементах;
- повысить долю мощности, излучаемой на зеркало расплава.

Наиболее подходящей конструкцией электронагревателя, удовлетворяющий предъявляемым требованиям, является конструкция электронагревателя замурованного типа, нагревательные элементы которого отделены от внутритрубного пространства защитными экранами или располагаются в огнеупорном электроизоляционном блоке. Преимуществом такой конструкции, по сравнению с электронагревателем, оснащенном открытыми

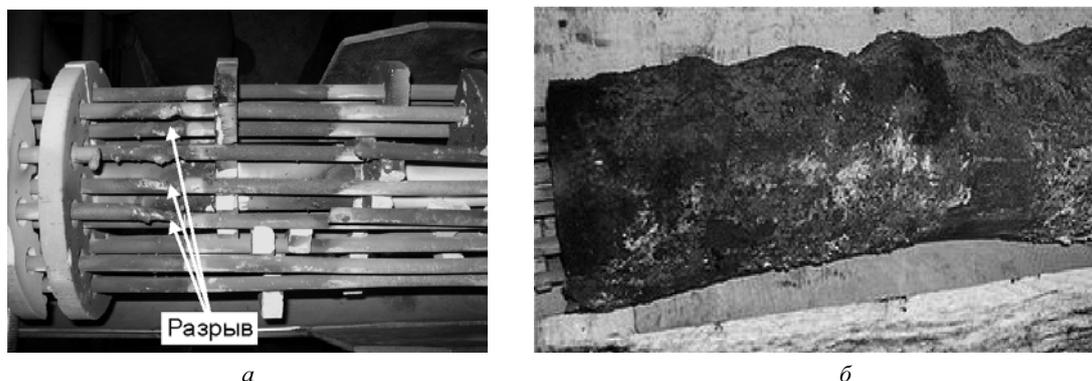


Рис. 1. Эксплуатационные дефекты после шести месяцев эксплуатации:  
а – нагревательного элемента Kanthal Tubothal; б – защитной трубы Kanthal APM

нагревательными элементами, является увеличение площади активно излучающей поверхности на 30...40%. Вместе с этим применение неметаллических материалов при изготовлении огнеупорного электроизоляционного блока позволяет снизить интенсивность зашлаковывания излучающей поверхности, в результате чего тепловое сопротивление между зеркалом расплава и нагревательными элементами снижается [6; 7].

С учетом всех этих факторов была разработана и исследована конструкция опытно-промышленного образца электронагревателя с повышенной степенью надежности для миксера сопротивления, получившая название «светящийся свод» (рис. 3). Для определения наиболее оптимальных соотношений характерных параметров электронагревателя конструкции «светящийся свод» была разработана конечно-элементная математическая модель электронагревателя с привлечением современных компьютерных средств и пакетов программ (SolidWorks, «Компас V9», ANSYS ICEM, ANSYS Multiphysics, ANSYS CFX).

Данная математическая модель позволяет анализировать нестационарное тепловое поле электронагревателя с изменением его основных параметров:  $l_{н.э}$  – длины радиационного нагревательного элемента;  $d_{н.э}$  – диаметра радиационного нагревательного элемента;  $S_{н.э}$  – расстояния между пазами под нагревательные элементы в теплопроводных блоках сводового электронагревателя;  $S_{с.б}$  – толщины теплопроводных блоков сводового электронагревателя;  $S_{т.с}$  – толщины теплопроводного слоя сводового электронагревателя.

Решение тепловой задачи сводится к нахождению температурного поля расплава, ограждающей футеровки и системы нагрева в каждый момент времени  $t$  [8].

В области электронагревателя теплообмен учитывается уравнением Фурье с внутренними источниками теплоты:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v, \quad (1)$$

где  $q_v$  – объемная мощность тепловыделения, Вт/м<sup>3</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг · °C);  $t$  – время, с;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура, °C;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °C).

В области футеровки теплообмен происходит за счет теплопроводности и учитывается уравнением (1) без последнего члена.

Теплообмен в воздушном внутривспечном пространстве между расплавом, футеровкой и электронагревателем осуществляется преимущественно за счет излучения и учитывается уравнением Стефана–Больцмана:

$$q = \varepsilon_r c_0 (T_n^4 - T_{p.r}^4), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_r$  – степень черноты расплава;  $c_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>);  $T_{p.r}$  – температура на поверхности расплава, °C;  $T_n$  – температура на поверхности электронагревателя, °C.

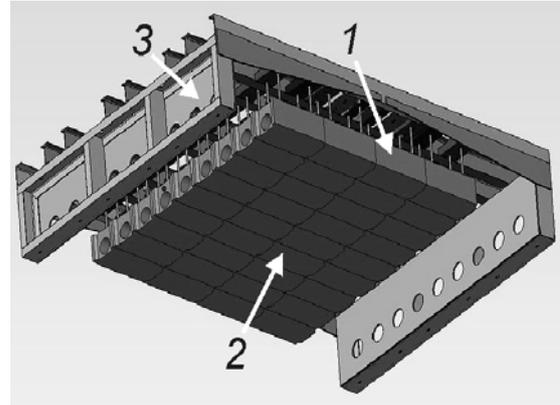


Рис. 3. Основные узлы электронагревателя с повышенной степенью надежности: 1 – теплопроводный слой; 2 – излучающая поверхность; 3 – каркас

Однозначное решение задачи определяется заданием начальных и граничных условий в начальный момент времени  $t_0$ :

$$T = f_0(x, y, z, T), \quad (3)$$

$$q_{vn} = \alpha \cdot (T_{пов} - T_{vn}), \quad (4)$$

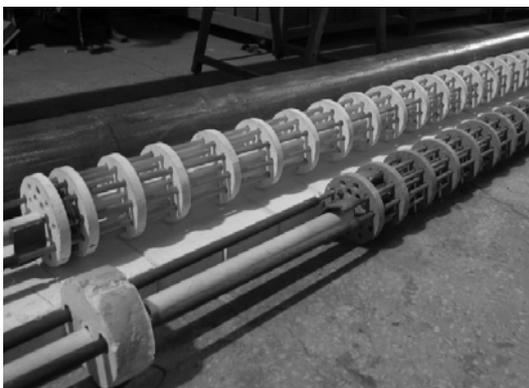
где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · °C);  $T_{vn}$  – температура окружающей среды, °C;  $T_{пов}$  – температура поверхности миксера, °C.

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  определяется по выражению

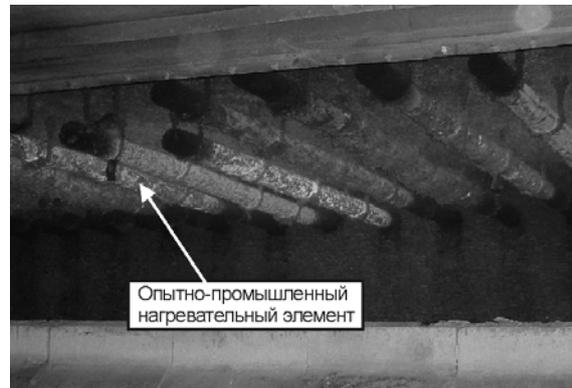
$$\alpha = a_0 + a_1 + (T_{пов} - 30) - a_2(T_{пов} - 30)^2 + a_3(T_{пов} - 30)^3, \quad (5)$$

где  $a_0, \dots, a_3$  – постоянные коэффициенты, зависящие от вида теплоотдающей поверхности.

Достоверность разработанной математической модели была оценена с помощью физической модели миксе-



а



б

Рис. 2. Опытно-промышленный образец нагревательного элемента с повышенной степенью надежности: а – в процессе лабораторных испытаний; б – при эксплуатации на миксере САМПИ-100

ра, оснащенного электронагревателем с повышенной степенью надежности, выполненной в масштабе 1:10. Сравнительный анализ экспериментального и расчетного распределений температуры в теплопроводном слое электронагревателя конструкции «светящийся свод», полученных на физической и математической моделях, выявил их высокую степень совпадения. Относительная погрешность измерений  $\epsilon_{pm}$  не превышала 9 % при доверительной вероятности  $P = 95\%$  (рис. 4).

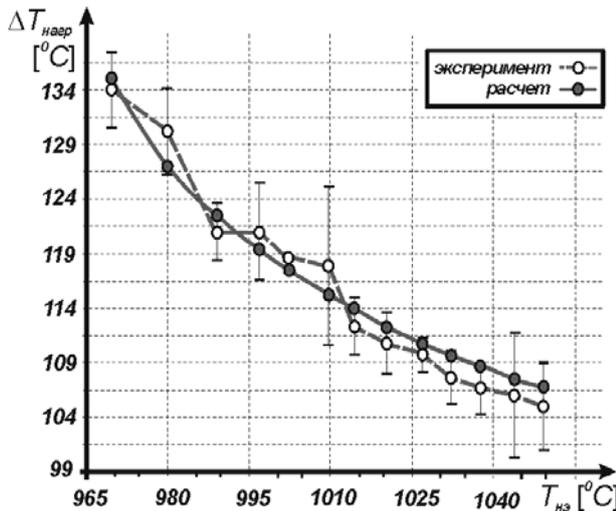


Рис. 4. Изменение температурного перепада в теплопроводном слое сводового электронагревателя физической модели  $\Delta T_{нагр}$  от температуры нагревательного элемента  $T_{нэ}$

В ходе проведения исследований с помощью математической модели были получены зависимости температурного перепада  $\Delta T_{нагр}$  и температуры излучающей по-

верхности  $T_{изп}$  от температуры нагревательных элементов  $T_{нэ}$  (рис. 5). Анализ этих зависимостей позволил установить, что при выполнении теплопроводного слоя из материала на основе корундокарбидокремниевое бетона ККБ-70 с коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{тс} = 4...7$  Вт/(м · °С) [9] в сочетании с увеличением эффективной площади излучающей поверхности среднеинтегральная температура излучающей поверхности может быть повышена (рис. 5, а), а температурный перепад между поверхностью расплава и излучающей поверхностью свода  $\Delta T_{пов,распл}$  уменьшен на 80 °С (рис. 5, б). В результате тепловая мощность, излучаемая на зеркало металла, в зависимости от температурного перепада между излучающей поверхностью и расплавом, возрастет в среднем 1,5–2 раза.

Кроме того, для подтверждения адекватности разработанной математической модели была проведена сравнительная оценка данных, полученных с помощью математической модели, имитирующей процесс нагрева электронагревателя конструкции «светящийся свод» миксера САМ-5, и данных, полученных в ходе натурального эксперимента на опытно-промышленном образце электронагревателя в период с 19 по 28 сентября 2007 г. Результаты численного и натурального экспериментов приведены в таблице.

В результате проведенных исследований была подтверждена высокая эксплуатационная надежность нагревательных элементов с повышенной степенью надежности конструкции ООО «НПЦ магнитной гидродинамики». Также было установлено, что при использовании конструкции электронагревателя сопротивления с развитой излучающей поверхностью, защитный блок которого выполнен из высокотеплопроводного огнеупорного бетона, а токопроводящие стержни нагревательных элементов – из многокомпонентных сплавов на основе фехра-

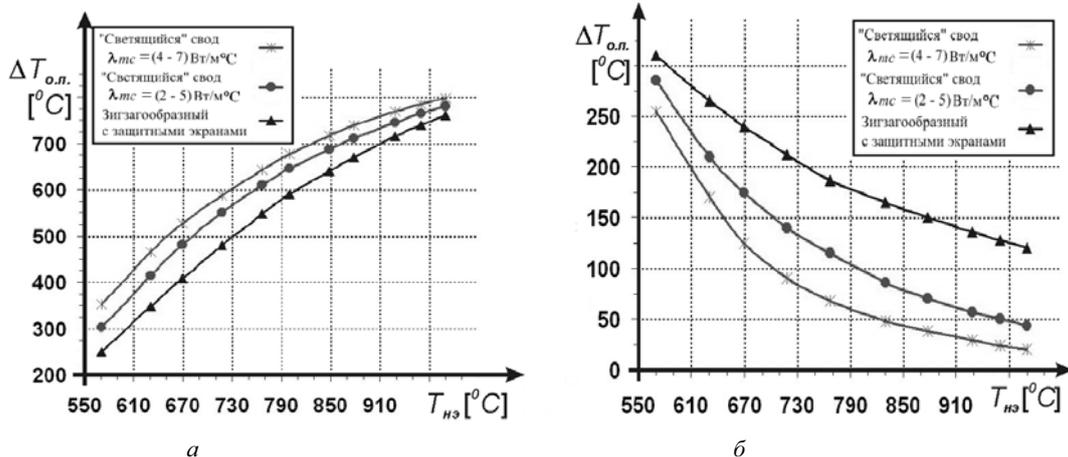


Рис. 5. Зависимости температуры отражающей поверхности  $T_{о.п.}$  (а) и температурного перепада  $\Delta T_{нагр}$  (б) от температуры нагревательного элемента  $T_{нэ}$

#### Температура на излучающей поверхности электронагревателя

| № термопары | Измеренная температура, °С | Расчитанная температура, °С | Относительная погрешность $\epsilon$ , % |
|-------------|----------------------------|-----------------------------|--|
| 1           | 778,3                      | 813,45                      | 4,317                                    |
| 2           | 845,7                      | 822,62                      | 2,802                                    |
| 3           | 846,7                      | 901,88                      | 6,122                                    |
| 4           | 837,3                      | 827,21                      | 1,224                                    |
| 5           | 784,7                      | 741,54                      | 5,816                                    |
| 6           | 926,0                      | 967,38                      | 4,278                                    |
| 7           | 930,7                      | 882,93                      | 5,407                                    |

лей, наблюдается значительное повышение срока службы и доли мощности, излучаемой на зеркало расплава.

#### Библиографические ссылки

1. Белавин Ю. А., Евстигнеев М. А., Чернявский А. Н. Трубчатые электрические нагреватели и установки с их применением. М. : Энергоатомиздат, 1989.

2. Resistance Heating Alloys and System for Industrial Furnaces : cat. 1-A-5B Kanthal / Kanthal AB. Hallstahammar, Sweden, 2001.

3. Investigation of Kanthal Tubothermal : investigation rep. № E07032 / Kanthal AB. Hallstahammar, Sweden, 2007.

4. Гутман М. Б., Плоткин А. Б., Шумков Ю. В. Срок службы нагревательных элементов из железо-хромалюминиевых сплавов сопротивления в воздушной атмосфере // Труды ВНИИ ЭТО : сб. науч. тр. № 11. М. : Энергоиздат, 1981. С. 3–14.

5. Пелевин А. Г., Фролов В. Ф., Тирфоненков Л. П. Новая конструкция нагревателя защищенного типа // Алюминий Сибири–2008 : сб. науч. ст. / ООО «Версо». Красноярск, 2008. С. 281–283.

6. Некоторые пути повышения тепловой эффективности алюминиевых печей-копильников / Ю. В. Видин, А. А. Темеров, А. К. Федюкович и др. // Теплообмен и гидродинамика : сб. науч. тр. / Краснояр. политехн. ин-т. № 4. Красноярск, 1976. С. 44–48.

7. Пат. 38915 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> F 27 D 1/02. Электрический миксер для приготовления алюминия и его сплавов / А. А. Темеров, В. Н. Тимофеев, П. А. Хоменков, А. В. Богданчиков. № 2004106958/20 ; заявл. 09.03.2004 ; опубл. 10.07.2004, Бюл. № 19.

8. Электронагреватель нового типа для миксера сопротивления / А. А. Темеров, Д. А. Михайлов, В. В. Гаврилов // Молодежь и наука – третье тысячелетие : сб. материалов Всерос. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / Краснояр. гос. техн. ун-т. Красноярск, 2005. С. 424–427.

9. Огнеупорные массы, бетоны и изделия для футеровок агрегатов плавки алюминия / В. И. Сизов, А. М. Горюховский, Е. В. Беклемышев и др. // Алюминий Сибири–2008 : сб. науч. ст. / ООО «Версо». Красноярск, 2008. С. 335–338.

A. A. Temerov, V. N. Timofeev, D. A. Mikhaylov

### RELIABILITY GROWTH AND ENERGETIC EFFICIENCY OF ELECTRIC HEATING SYSTEMS OF ELECTRIC HOLDING FURNACES FOR ALUMINIUM ALLOYS

*In the article the authors consider reasons of low operate reliability of heating elements of resistance holding furnaces for preparation of aluminium alloys. Basing on statistical data and results of numerical, physical and natural experiments the authors offer constructive solutions for operation reliability growth and energetic efficiency of electric heating systems.*

*Keywords: resistance holding furnace, electric heating system, resistance electroheater, finite element mathematical model, temperature field, thermal power of electroheater.*

© Темеров А. А., Тимофеев В. Н., Михайлов Д. А., 2010