

Е. А. Павлов, С. В. Боговалов, В. Н. Тимофеев, Д. С. Надточий

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ РАСПЛАВОВ В МИКСЕРАХ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Рассмотрены результаты моделирования нестационарного и стационарного магнитогидродинамического перемешивания алюминиевых расплавов в миксерах сопротивления. Математическое моделирование осуществлено на основе совместного использования программ «Ansys Etag» и «Ansys CFX»

В последнее время в цветной металлургии и литейном производстве все большее распространение получают электротехнологические установки, предназначенные для получения высококачественных, многокомпонентных сплавов. Особенно велик спрос на подобные установки в литейном производстве алюминиевых сплавов. Требования к качеству алюминиевых сплавов и изделий из них постоянно растут в связи с ростом их использования практически во всех областях промышленности. И стратегии крупных металлургических компаний, таких как ОАО «Русский алюминий», «Сибирско-Уральская алюминиевая компания» и др., направлены на увеличение доли сплавов в общем объеме продукции [1].

Особое место в установках для приготовления сплавов занимают магнитогидродинамические (МГД) технологии, совмещающие простоту, надежность и высокую эффективность. Применение МГД-перемешивания для интенсификации приготовления алюминиевых сплавов является практически обязательным условием при создании современных литейно-плавильных агрегатов [2]. На сегодняшний день для приготовления сплавов на заводах ОАО «Русский алюминий» и ОАО «Сибирско-Уральская алюминиевая компания» наибольшее распространение получила технологическая установка, состоящая из поворотного миксера сопротивления и МГД-перемешивателя (МГДП).

Миксер алюминиевых сплавов (печь) с индуктором предназначен для приготовления сплавов за счет интенсификации процесса перемешивания и растворения компонентов сплава в расплаве алюминия. При включении МГДП индук-

тор создает электромагнитное поле, состоящее из бегущего и пульсирующего магнитного полей, по-разному проявляющихся в разных зонах индуктора, под действием которых расплавленный металл перемешивается в одной части печи (при реверсе бегущего магнитного поля расплав перемешивается в другой ее части). Для обеспечения проникновения бегущего электромагнитного поля (ЭМП) в месте установки МГДП монтируется плита из немагнитной стали. Автоматическое управление реверсированием движения магнитного поля позволяет достигать требуемых технологических параметров расплава через 10...30 мин (в зависимости от марки сплава и объема металла в миксере).

Технологическая установка для приготовления алюминиевых сплавов, состоящая из поворотного миксера и горизонтально установленно-го МГДП включает следующие основные части (рис. 1): металлический каркас – 1; футеровка – 2; ванна расплава – 3; электронагреватели – 4; форкамера – 5; заливочный карман – 6; вытяжной зонт – 7; поворотная опора – 8. Камера миксера имеет две тепловые зоны – нижнюю 3 со сплавом и верхнюю 9 без расплава (внутренняя полость). Под подиной миксера установлен МГД-перемешиватель 10. Для контроля температуры нагревателей на своде имеются термодары 11. Термодары, установленные на поверхности 12 и в глубине расплава 13, контролируют температуру расплава соответственно у поверхности расплава и у подины. По показаниям этих термодар производится регулирование процесса приготовления сплава за счет изменения энергии, подводимой к электронагревателям.

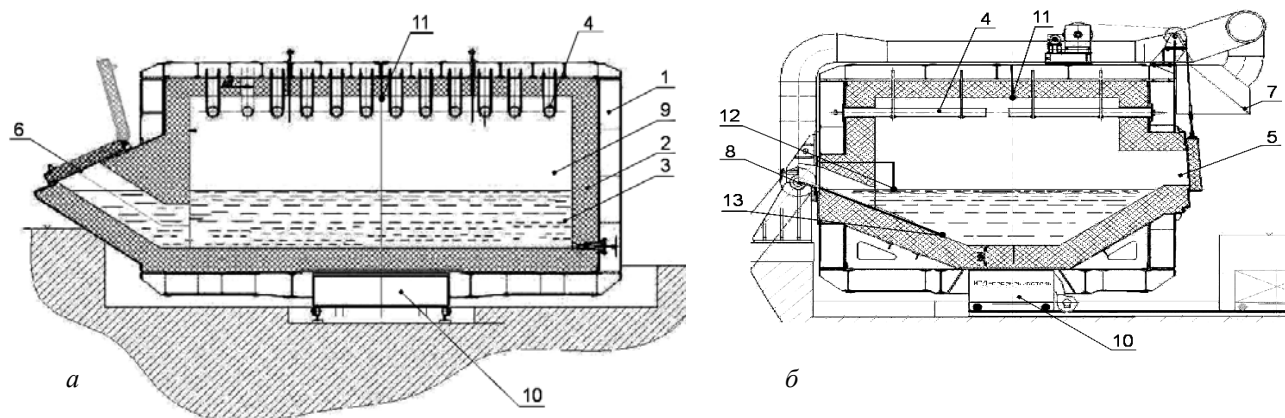


Рис. 1. Разрезы миксера сопротивления с МГДП: а – продольный разрез; б – поперечный разрез (обозначения см. в тексте)

Индуктор МГДП, устанавливаемый под подину позицию 10 (рис. 1), или с боковой стороны печи представляет собой линейную индукционную машину (ЛИМ) [3]. Ее особенности состоят в том, что она является двух- или трехфазной с $2p = 2$ и работает в условиях большого немагнитного зазора $\Delta_n = 0,2 \dots 0,5$ м, что обуславливает низкий $\cos \varphi = (0,1 \dots 0,4)$, механический КПД и использование напряжения пониженной частоты ($f = 0,1 \dots 2$ Гц).

Наиболее распространенным на территории Российской Федерации является МГДП Г-2,5 производства ООО «НПЦ магнитной гидродинамики» (г. Красноярск), который представляет собой двухфазную ЛИМ с чередующимся типом обмотки [4] и предназначен для установки под подину печи для печей емкостью 10...60 т и немагнитным зазором $\Delta_n = 0,25 \dots 0,40$ м. Характеристики МГДП -2,5 следующие: масса – 6 500 кг; длина – 2 185 мм; высота – 800 мм; ширина – 1 200 мм; ширина магнитопровода – 500 мм; ток фазы – 200 А; линейная плотность тока – $1,6 \cdot 10^5$ А/м; частота питающего напряжения – 0,5 Гц; потребляемая мощность – 120 кВА; охлаждение – воздушное принудительное.

Использование МГДП в металлургии началось еще в 60-е гг. прошлого века и основывалось в основном на эмпирическом подборе нужного индуктора для конкретной печи, так как аналитический способ анализа всей совокупности электромагнитных и термогидродинамических явлений протекающих в индукторе и пространстве печи слишком сложен [5]. Методики, предназначенные для расчета ЛИМ, позволяли рассчитать индуктор МГДП с большим запасом усилия, развиваемого в жидком металле, что в большинстве случаев не оправданно, так как при этом не учитывается достигаемый тепломассобмен и растворимость лигатур [4; 5]. Методики, предназначенные для расчета печей, в свою очередь не учитывали МГД-воздействия, оказываемого на расплав, что делало оценку тепловой работы печи некорректной [6].

Большое количество допущений и упрощений расчетных моделей в существующих методиках и невозможность точной количественной оценки параметров технологического процесса с МГД-перемешивателем делает их малоприменимыми для проектирования современных литейно-плавильных агрегатов. Поэтому разработка корректных методик расчета МГД-перемешивания является весьма актуальной задачей.

Математическая модель миксера сопротивления с МГДП. Для полного учета всей совокупности физических процессов, протекающих в описанной выше технологической установке авторами была создана трехмерная численная параметрическая модель, которая позволяет исследовать электромагнитные и гидродинамические поля, получать дифференциальные и интегральные характеристики этих полей, проводить оптимизационные вычисления.

Для решения такой сложной задачи, как нестационарное МГД-перемешивание расплава в миксере, использовался прием разбиения общей задачи на две: термогидродинамическую и электромагнитную, решаемых соответственно в программах «Ansys CFX» и «Ansys Emax» (рис. 2). Взаимный учет скоростей для электромагнитной задачи и сил для гидродинамической задачи производился только в области ванны расплава, где осуществлялась итерационная корректировка скоростей и сил. Для корректного решения уравнений ЭМП в нестационарном и комплексном виде с произвольным полем скоростей в программу «Ansys Emax» были добавлены два новых конечных элемента с соответствующими формулировками.

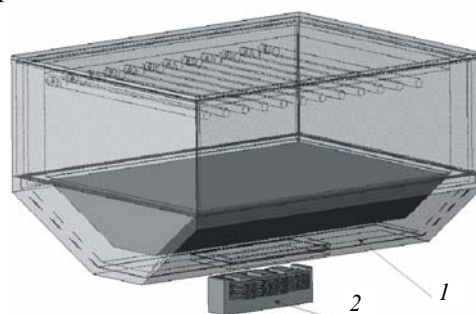


Рис. 2. Геометрия расчетной области совместной электромагнитной и термогидродинамической задачи:

1 – миксер сопротивления; 2 – индуктор МГДП

Решение электромагнитной задачи осуществлялось в областях, включающих области решения задачи электродинамики (рис. 3) и термогидродинамики (рис. 4). Область решения электромагнитной задачи включает: ванну расплава, немагнитное гнездо, обмотки индуктора, магнитопровод, непроводящую и немагнитную область, описывающую воздух. Область решения термогидродинамической задачи включает: области многослойной футеровки свода, стен, подины, ванну расплава, слой шлака, внутреннюю полость, нагреватели.

Нестационарное электромагнитное поле в расчетной области электромагнитной задачи описывается системой уравнений Максвелла без учета токов смещения [7]:

$$\text{rot} \vec{H} = \gamma (\vec{E} + [\vec{v} \times \vec{B}]); \quad (1)$$

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0. \quad (3)$$

Система уравнений (1), (2), (3) должна быть дополнена следующим материальным уравнением:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}.$$

Эта система решается путем замены [7]:

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$$

Используя кулоновскую калибровку

$$\text{div} \vec{A} = 0,$$

а также считая, что магнитная проницаемость в каждой области постоянна, систему уравнений Максвелла можно привести к следующему виду [7]:

$$\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} = \frac{1}{\mu_a \gamma} \operatorname{div} \cdot \operatorname{grad} \bar{A} - \nabla \varphi + [\bar{v} \times \operatorname{rot} \bar{A}]; \quad (4)$$

$$\operatorname{div} \left(\gamma \left(-\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \nabla \varphi + [\bar{v} \times \operatorname{rot} \bar{A}] \right) \right) = 0. \quad (5)$$

Решение уравнения (4) осуществляется для мгновенных и комплексных величин стандартными процедурами метода конечных элементов минимизации функционала [8; 9].

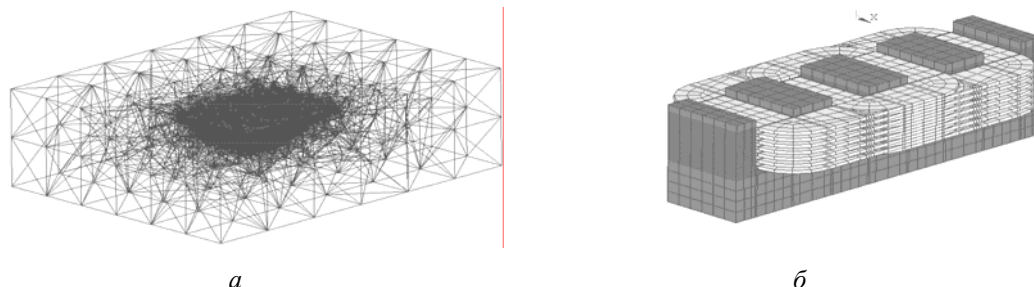


Рис. 3. Сетка конечных элементов (~165 000 элементов, 86 000 узлов), аппроксимирующих область электромагнитной задачи: а – каркасное представление всей сетки; б – аппроксимация индуктора сеткой

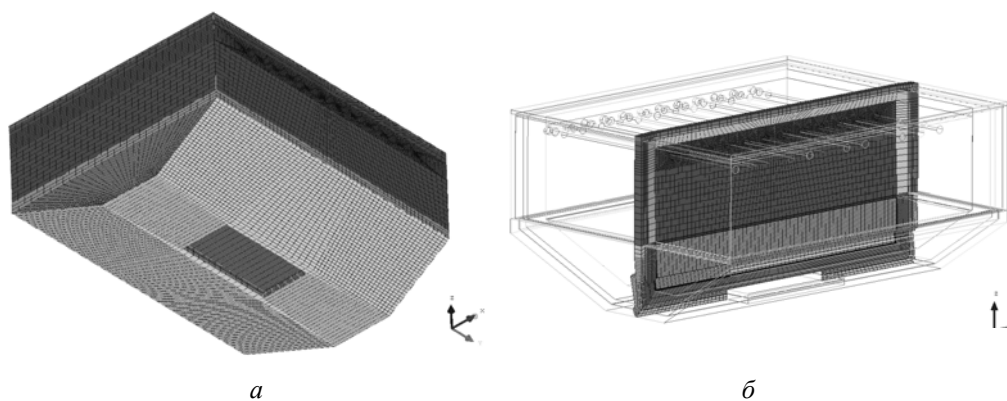


Рис. 4. Сетка контрольных объемов (~300000 элементарных объемов), аппроксимирующих термогидродинамическую задачу: а – вид на сетку; б – сетка в продольном разрезе

Нестационарное термогидродинамическое поле в расчетной области описывается системой уравнений включающей уравнение неразрывности (6), уравнений моментов для турбулентного движения (7)...(9) и уравнением теплового баланса (10) [10]:

$$\rho \operatorname{div}(\mathbf{U}) = 0; \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial (U)}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(UU) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \eta \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad} U) + ;$$

$$+ \left[-\rho \frac{\partial (\overline{u'^2})}{\partial x} - \rho \frac{\partial (\overline{u'v'})}{\partial y} - \rho \frac{\partial (\overline{u'w'})}{\partial z} \right] + F_{\text{Лx}} \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial (V)}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(VU) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \eta \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad} V) +$$

$$+ \left[-\rho \frac{\partial (\overline{u'v'})}{\partial x} - \rho \frac{\partial (\overline{v'^2})}{\partial y} - \rho \frac{\partial (\overline{u'w'})}{\partial z} \right] + F_{\text{Лy}}, \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial (W)}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(WU) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \eta \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad} W) +$$

$$+ \left[-\rho \frac{\partial (\overline{u'w'})}{\partial x} - \rho \frac{\partial (\overline{u'v'})}{\partial y} - \rho \frac{\partial (\overline{w'^2})}{\partial z} \right] + \rho g + F_{\text{Лz}}, \quad (9)$$

$$\rho c \frac{\partial (T)}{\partial t} + \rho c T \operatorname{div}(\mathbf{U}) = \lambda \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad} T) + Q_{\text{Дж}} + S_T. \quad (10)$$

Для замыкания системы уравнений (6)...(10) используется k - ϵ модель турбулентности, описываемая уравнениями [10]

$$\rho \frac{\partial (k)}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(kU) =$$

$$= \operatorname{div} \left[\frac{\eta_t}{\sigma_k} \operatorname{grad} k \right] + 2\eta_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \epsilon \quad (11)$$

$$\rho \frac{\partial (\epsilon)}{\partial t} + \rho \operatorname{div}(\epsilon U) =$$

$$= \operatorname{div} \left[\frac{\eta_l}{\sigma_\varepsilon} \operatorname{grad} \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\eta_l E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\varepsilon\rho} \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (12)$$

Описанная выше математическая модель имеет более 40 варьируемых параметров, сочетание которых позволяет производить расчеты для миксеров любой емкости и размеров, с любым допустимым сочетанием параметров индуктора.

В процессе математического моделирования были получены следующие результаты:

- распределение скоростей в ванне расплава с течением времени при различных частотах питающего напряжения индуктора;
- распределение индукции магнитного поля с течением времени;
- распределение температур в пространстве миксера с течением времени;
- интегральные и дифференциальные характеристики электромагнитного и теплового полей в нестационарном режиме;
- интегральные и дифференциальные характеристики электромагнитного и теплового полей

при постановки задачи электродинамики в комплексной форме;

- оптимальные частоты работы МГДП при разных полюсных шагах и немагнитных зазорах;
- сделана оценка влияния тангенциального F_t и нормального F_n усилия, развиваемого ЭМП индуктора в расплаве.

Распределение скоростей в ванне расплава в момент времени $\tau = 180$ с (рис. 5) характерно для установившегося режима скорости при частоте питающего напряжения индуктора $f = 0,5$ Гц и токе $I = 200$ А.

Время установления скорости вблизи дна ванны хорошо согласуется с результатами натурных экспериментов (рис. 6, 7).

В результате решения задачи электродинамики в комплексной форме было получено распределение действующих значений величин F_t , F_n , индукции поля B (рис. 8), активной мощности Q (рис. 9), а также распределение температур на поверхности миксера, полученных в результате теплового анализа показано (рис. 10).

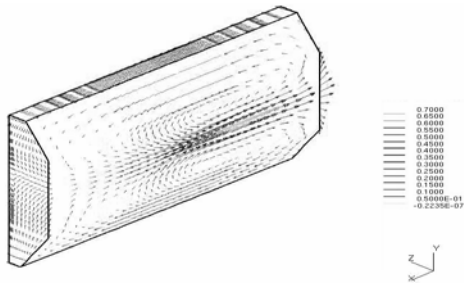


Рис. 5. Скорости в ванне алюминия при установившемся режиме: $\tau = 180$ с, $f = 0,5$ Гц, $I = 200$ А

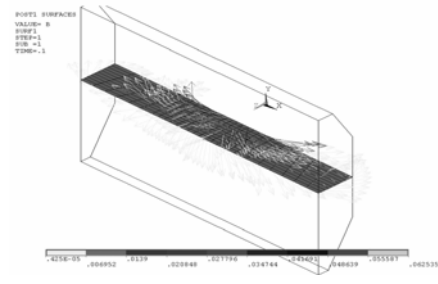


Рис. 6. Распределение электромагнитных сил в сечении ванны: $\tau = 180$ с, $f = 0,5$ Гц, $I = 200$ А

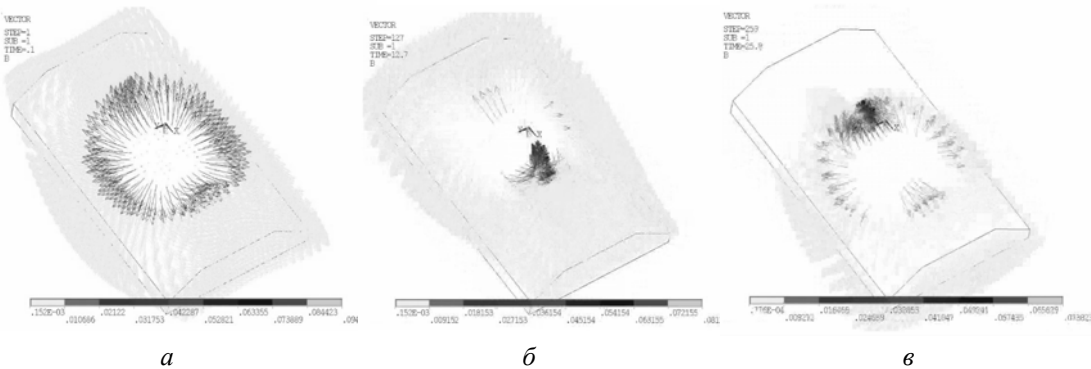


Рис. 7. Распределение магнитуды индукции магнитного поля в ванне расплава в различные моменты времени

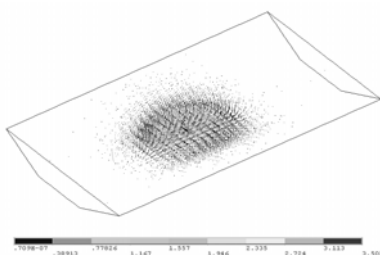


Рис. 8. Распределение сил Лоренца в ванне ($f = 0,5$ Гц, $I = 200$ А)

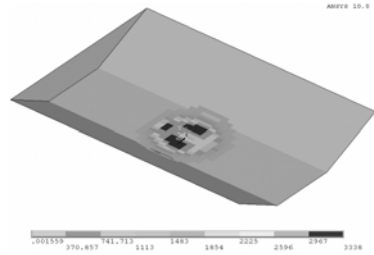


Рис. 9. Распределение удельной активной мощности в ванне ($f = 0,5$ Гц, $I = 200$ А)

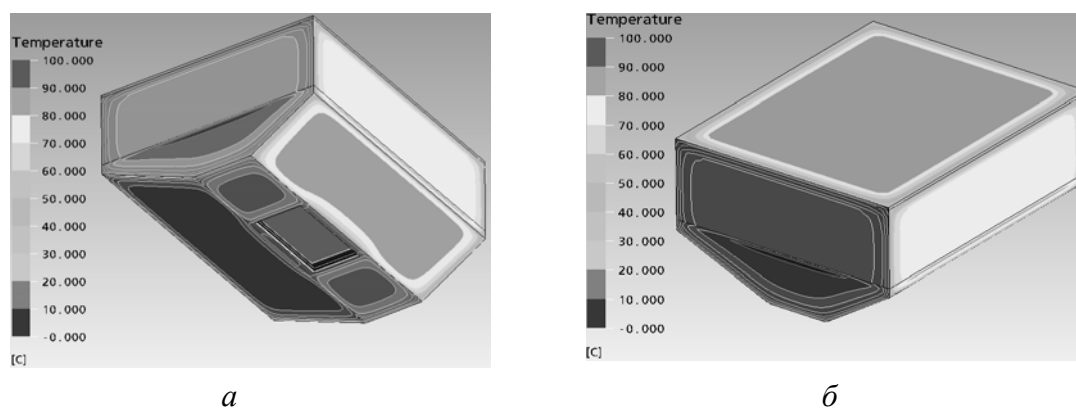


Рис. 10. Распределение температур на поверхности миксера:
а – вид снизу; б – вид сверху

Таким образом, в результате анализа расчетных данных электромагнитного, гидродинамического и теплового полей были сделаны выводы об эффективности различных МГДП при варьируемых параметрах источника питания (f , I). Выбраны оптимальные параметры, обеспечивающие максимальную эффективность МГД-перемешивания при минимальной энергоёмкости процесса. В результате корректного учета тепломассообмена в тепловом расчете миксера проведена оценка влияния перемешивания на тепловой баланс системы и определена мощность нагревателей. Кроме оценки вариаций существующих миксеров с МГДП, обоснованы конструкции вновь создаваемых и перспективных миксеров с глубиной расплава до 2 м.

Библиографический список

1. Итоги работы РУСАЛа (По материалам пресс-службы РУСАЛ_УК) // Техн.-экон. вестн. РУСАЛа: Итоги работы дивизионов РУСАЛа // под. ред. В. Ю. Бузунова ; Краснояр. алюмин. 3-д. Вып. 14. Красноярск, 2006. С. 5–7.
2. Непрерывное литье алюминиевых сплавов / В. И. Напалков, Г. В. Черепок, С. В. Махов, Ю. М. Черновол. М. : Интернет Инжиниринг, 2005. 512 с.
3. Вольдек, А. И. Индукционные магнетогидродинамические машины с жидкометаллическим

рабочим телом / А. И. Вольдек. Л. : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1970. 272 с.

4. А. с. 1697577 СССР, МКИ F 27 D 23 / 04. Электромагнитный перемешиватель жидкого металла / В. Н. Тимофеев, Р. М. Христинич, С. А. Бояков, А. А. Темеров и др. (СССР). № 4755856/25 ; заявл. 01.11.89 ; опубл. 08.08.91.

5. Верте, Л. А. МГД-технология в производстве черных металлов / Л. А. Верте. М. : Metallurgia, 1990. 120 с.

6. Рафалович, И. М. Теплопередача в расплавах, растворах и футеровке печей и аппаратов / И. М. Рафалович. М. : Энергия, 1977. 304 с.

7. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. М. : Гардарики, 2001. 317 с.

8. Zienkiewicz, O. C. The finite element method. Vol. 1. The basis / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor. Woburn : Butterworth-Heinemann, 2000. 712 p.

9. Расчет магнитных полей электрических машин методом конечных элементов / А. Л. Кислицин, А. М. Крицштейн, Н. И. Солнышкин, А. Д. Эрнст. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1980. 200 с.

10. Versteeg, H. K. An Introduction to computational fluid dynamics: The finite volume methods approach / H. K. Versteeg, W. Malalasekera. London : Prentice Hall, 1996. 257 p.

E. A. Pavlov, S. V. Bogovalov, V. N. Timofeev, D. S. Nadtochiy

MAGNETOHYDRODYNAMIC MIXING OF ALUMINUM ALLOYS IN RESISTIVE TILTING FURNACES

It is considered the results of transient and static magnetohydrodynamic mixing of aluminum alloys in the resistive tilting furnace modeling. Mathematical simulation is accomplished on the base of joint Ansys Emag and Ansys CFX programs.