

ИССЛЕДОВАНИЕ МГД-СТАБИЛЬНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Н.П. Савенкова

А.Ю. Мокин

Н.С. Удовиченко

mknandrew@mail.ru

nudovichenko@mail.ru

МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Математическое моделирование процесса работы промышленного электролизера алюминия позволяет спрогнозировать и указать причины развития МГД-нестабильности, возникновения анодного эффекта, перекоса зеркала металла, а также исследовать другие основные особенности процесса электролиза алюминия. Для анализа МГД-стабильности электролизера адаптирована трехмерная математическая модель, в которой используется многофазный подход к описанию среды (металл, газ, электролит), а также взаимосвязь гидродинамических, электромагнитных, электрохимических и тепловых процессов, протекающих в ванне. Проведены тестовые расчеты. Подтверждены наличие сходимости предложенного численного решения поставленной задачи с достаточной точностью и адекватность модели. Описаны результаты исследования с помощью вычислений МГД-стабильности многоанодного электролизера при изменении теплового режима и конфигурации формы рабочего пространства, учитывая развитие МГД-нестабильности при замене выгоревших анодов и моделирование границ раздела фаз металл–электролит и зоны обратного окисления. Оценено влияние на МГД-стабильность различных форм начальных конфигураций настыли. Исследовано влияние параметров процесса на форму рабочего пространства ванны, которая, как поверхность раздела фаз металл–электролит и поверхность зоны обратного окисления, является динамическим объектом. В частности, изучено влияние изменения

Ключевые слова

МГД-стабильность, электролизер, граница поверхности раздела сред, электролиз алюминия, многоанодный электролизер

потенциала на МГД-стабильную форму рабочего пространства ванны. Показано, что варьируя величину потенциала на любой паре анодов, можно менять форму рабочего пространства электролизной ванны: при увеличении потенциала происходит плавление настывшей, при уменьшении — нарастание. При этом замечено увеличение амплитуды колебаний жидкого металла и нижней границы зоны обратного окисления, но их изменения находятся в диапазоне, приемлемом для МГД-стабильности процесса электролиза

Поступила 25.03.2020

Принята 06.04.2020

© Автор(ы), 2020

Введение. Настоящая работа посвящена математическому моделированию процесса работы промышленного алюминиевого электролизера и влиянию процессов тепломассопереноса на магнитогидродинамическую (МГД) стабильность электролиза. Основные показатели процесса электролиза крайне сложно контролировать из-за высокой температуры (более 900 °С), химически агрессивной среды, большой силы подаваемого на ванну тока [1, 2]. Учитывая тесное взаимодействие процессов, протекающих внутри ванны, с помощью математического моделирования можно получить более полное представление о тепловом режиме внутри ванны, величинах электромагнитных полей, распределении полей скоростей, форме поверхности жидкого металла и зоны обратного окисления, динамике формы рабочего пространства электролизной ванны, скорости выделения газов, возникающих при химических реакциях.

В настоящей работе используется трехмерная трехфазная математическая модель, описывающая основные виды процессов, происходящих в алюминиевом электролизере: электромагнитных, гидродинамических, тепловых и химических. Выполненные расчеты показали зависимость МГД-стабильности ванны от формы ее рабочего пространства. Учет взаимосвязи химических, тепловых и МГД-процессов позволяет исследовать МГД-нестабильность промышленного процесса электролиза алюминия при различных возмущениях в технологии.

Математическая модель. В основе разработанной модели лежит многофазный подход: смесь в электролизной ванне состоит из трех фаз (жидкий металл, газ и электролит). При моделировании гидродинамических процессов в электролизной ванне за основу берется система уравнений Навье — Стокса, записанная в трехфазной среде рабочего пространства электролизной ванны. Уравнения Нернста — Планка — Пуассона описывают химическую кинетику для основных ионов, участвующих в процессе электролиза

алюминия. Для описания электромагнитных полей и плотности электрического тока используется система уравнений Максвелла.

Каждая фаза в гетерогенной смеси занимает только часть элементарного объема, соответственно, вводятся α_m ($m = 1, 2, 3$) — объемные доли, характеризующие занимаемые каждой фазой смеси доли в элементарном объеме [3, 4]. При этом естественным образом предполагаем, что в элементарном объеме смеси должно выполняться уравнение объемного баланса

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1.$$

Для описания тепловых процессов в объеме ванны используется упрощенная модель, где температура считается скалярной характеристикой смеси и меняется за счет источника джоулева тепла, конвекции и диффузии [5].

Полностью модель и граничные условия рассматриваются в работе [4].

Изменение формы рабочего пространства ванны. Форма рабочего пространства электролизной ванны зависит от параметров процесса и является динамическим объектом, как и поверхность зоны обратного окисления и поверхность раздела фаз металл–электролит [6]. Нарастание или плавление гарнисажа и настыли электролизной ванны, которые образуют форму рабочего пространства ванны, происходит при значении температуры ниже или выше критической (945 °С) [7, 8]. В свою очередь, температура рабочего пространства ванны изменяется из-за поступления теплоты от электрического тока, протекающего через расплав, и потери теплоты через борта ванны [9, 10]. Следовательно, изменяя распределение потенциала по аноду и тем самым варьируя плотность электрического тока, можно влиять на форму рабочего пространства электролизной ванны [11, 12]. Результаты расчетов для различных начальных форм настыли, соответствующие практическим наблюдениям при промышленной эксплуатации ванны [13], показали, что процесс электролиза протекает более стабильно, когда настыль подводится под проекцию анода.

В работе проведены исследования возможности динамического влияния на форму рабочего пространства электролизера с помощью распределения потенциала по анодам для поддержания геометрии, соответствующей наиболее МГД-стабильной работе электролизера [14, 15]. При этом в начальный момент времени линейный скос настыли подводится под проекцию анодов на дно ванны, а области с наибольшей по модулю плотностью тока расположены в углах подины (область ванны с нулевым потенциалом) и в углах анодов [7].

Показано, что области с повышенной температурой соответствуют областям с наибольшей по модулю плотностью тока, из чего следует прямая связь между температурой и плотностью тока в электролизной ванне.

При равномерном распределении потенциала по анодам распределение температуры и плотность тока (рис. 1) остаются качественно неизменными.

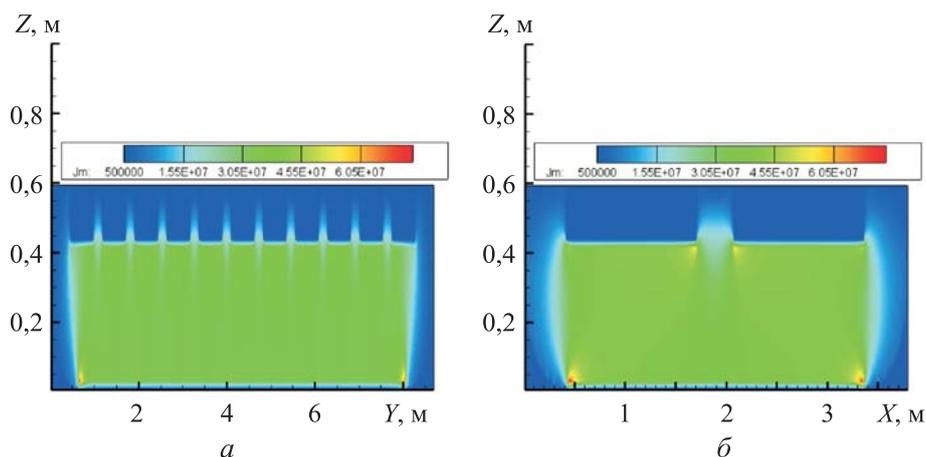


Рис. 1. Начальное распределение плотности тока:

a — ближайший к началу координат ряд анодов, срез плоскостью YZ ;

б — пятая пара анодов, срез плоскостью XZ

При уменьшении на 15 % потенциала на пятой паре анодов в ванне электролизера изменяется температура и происходит перераспределение плотности тока (рис. 2, *a*, *б*). В результате рабочее пространство ванны деформируется из-за нарастания настыли и гарнисажа: деформация составляет ~ 12...16 см.

На крайней паре анодов изменение формы ванны при уменьшенном на 15 % потенциале возникает с одного края симметрично относительно оси OY (рис. 2, *в*, *г*). Поскольку рассматриваемая пара анодов крайняя, перераспределение теплоты протекает отлично от перераспределения теплоты в случае, когда рассматривается пятая пара анодов. Рабочая область электролизной ванны сильнее остывает, поэтому нарастание гарнисажа становится более интенсивным (в среднем на 6 см).

Если потенциал увеличивается на 15 % на пятой паре анодов, плотность протекающего по ванне тока также увеличивается (рис. 2, *д*, *е*), что приводит к увеличению выделяемой теплоты. Увеличение формы рабочего пространства ванны составляет ~ 10...13 см относительно начальной формы. Происходит существенное увеличение плотности протекающего в ванне тока. Увеличение тока ведет к последующему размытию гарнисажа и настыли.

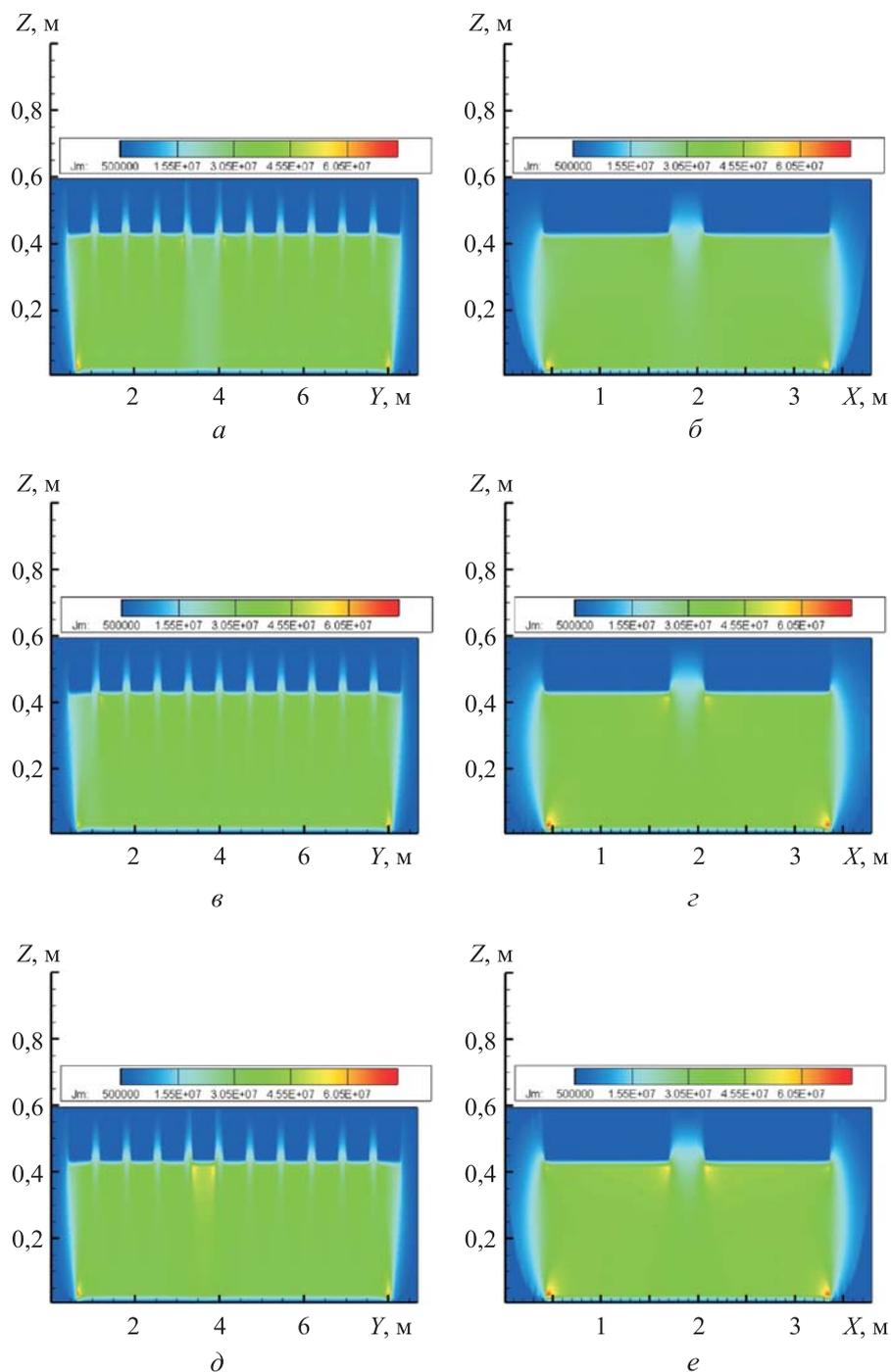


Рис. 2. Результирующее распределение плотности тока в электролизной ванне при $t = 20$ с:
a, в, д — ближайший к началу координат ряд анодов, срез плоскостью YZ ; *б, е* — пятая пара анодов, срез плоскостью XZ ; *з* — первая пара анодов, срез плоскостью XZ

Таким образом, изменение потенциала в отрицательную и положительную сторону на любой паре анодов приводит к тому, что форма рабочего пространства электролизной ванны изменяется: при увеличении потенциала настель плавится, при уменьшении потенциала настель нарастает. К тому же амплитуда колебаний жидкого металла и нижней границы зоны обратного окисления также возрастает, при этом их изменения находятся в диапазоне, приемлемом для МГД-стабильности работы электролизера.

Заключение. Показано, что изменением формы рабочего пространства электролизера можно управлять, варьируя распределение потенциала на анодах. Вычислительные эксперименты в зоне расплавов по распределению температуры позволили увеличить степень точности рабочей модели электролизера. Разработанная математическая модель позволяет проводить моделирование различных технологических особенностей протекания промышленного электролиза алюминия, исследование которых приводит к уменьшению потерь выхода металла по току.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Thonstad J., Fellner P., Haarberg G.M., et al. Aluminium electrolysis: fundamentals of the hall-heroult process. Düsseldorf, Aluminum, 2001.
- [2] Bojarevics V.V., Romerio M.V. Long waves instability of liquid metal-electrolyte interface in aluminium electrolysis cells: a generalization of Sele's criterion. *Eur. J. Mech. B/Fluids*, 1994, vol. 13, no. 1, pp. 33–56.
- [3] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М., Наука, 1987.
- [4] Савенкова Н.П., Анпилов С.В. Двухфазная трехмерная модель МГД-стабильности алюминиевого электролизера. *Тихоновские чтения. Сб. тез.* М., МАКС Пресс, 2011, с. 70–71.
- [5] Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М., Энергоатомиздат, 1984.
- [6] Савенкова Н.П., Кузьмин Р.Н., Анпилов С.В. и др. Моделирование влияния динамики изменения внутреннего пространства ванны алюминиевого электролизера на МГД-процессы. *Успехи прикладной физики*, 2016, т. 4, № 4, с. 409–415.
- [7] Елизарова Т.Г., Милюкова О.М. Численное моделирование течения вязкой несжимаемой жидкости в кубической каверне. *Журнал вычислительной математики и математической физики*, 2003, т. 43, № 3, с. 453–466.
- [8] Stellingwerf R.F., Wingate C.A. Impact modelling with Smooth Particle Hydrodynamics. *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 1994, vol. 65, pp. 1117–1128.
- [9] Савенкова Н.П., Кузьмин Р.Н., Проворова О.Г. и др. Двумерная и трехмерная математические модели электролиза алюминия. *Динамика сложных систем — XXI век*, 2009, № 2, с. 53–60.

- [10] Белолипецкий В.М., Пискажова Т.В. Математическое моделирование процесса электролитического получения алюминия для решения задач управления технологией. *Известия вузов. Цветная металлургия*, 2013, № 4, с. 59–63. DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2013-4-59-63>
- [11] Савенкова Н.П., Анпилов С.В., Кузьмин Р.Н. и др. Двухфазная трехмерная модель алюминиевого электролизера. *Прикладная физика*, 2012, № 3, с. 111–115.
- [12] Савенкова Н.П., Шобухов А.В., Анпилов С.В. и др. Математическое моделирование физико-технологического процесса электролиза. *Прикладная физика*, 2009, № 6, с. 43–51.
- [13] Mohsen A., Désilets M., Proulx P. On the analysis of ionic mass transfer in the electrolytic bath of an aluminum reduction cell. *Can. J. Chem. Eng.*, 2014, vol. 92, no. 11, pp. 1951–1964. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.22047>
- [14] Severo D.S., Gusberti V. A modelling approach to estimate bath and metal heat transfer coefficients. In: *Essential readings in light metals*. Springer, 2016, pp. 309–314.
- [15] Severo D.S., Gusberti V., Pinto E.C.V., et al. Modeling the bubble driven flow in the electrolyte as a tool for slotted anode design improvement. In: *Essential readings in light metals*. Vol. 2. Springer, 2016, pp. 409–414.

Савенкова Надежда Петровна — д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник кафедры вычислительных методов факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3).

Мокин Андрей Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры вычислительных методов факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3).

Удовиченко Нелля Сергеевна — канд. физ.-мат. наук кафедры вычислительных методов факультета вычислительной математики и кибернетики МГУ имени М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 3).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Савенкова Н.П., Мокин А.Ю., Удовиченко Н.С. Исследование МГД-стабильности алюминиевого электролизера при различных условиях проведения технологического процесса. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2020, № 5, с. 86–95. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-5-86-95>

INVESTIGATING MAGNETOHYDRODYNAMIC STABILITY OF AN ALUMINIUM ELECTROLYTIC CELL UNDER VARIOUS MANUFACTURING PROCESS CONDITIONS

N.P. Savenkova

A.Yu. Mokin

N.S. Udovichenko

mknandrew@mail.ru

nudovichenko@mail.ru

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Mathematical simulation of industrial aluminium electrolytic cell operation allows us to predict and indicate the causes of magnetohydrodynamic (MHD) instability and bath level skewing, as well as investigate other features of the aluminium electrolysis process. In order to analyse the MHD stability of the electrolytic cell, we adapted a three-dimensional mathematical model that uses a multi-phase approach to describing the media (aluminium, electrolyte and gas) and treats the hydrodynamic, electromagnetic, thermal and electrochemical processes in the bath as interrelated. Our test calculations confirmed that the model is adequate and that the numerical solution proposed converges with sufficient accuracy. The paper describes our numerical investigation results concerning MHD stability of a multi-anode electrolytic cell when its thermal conditions and working space shape configuration change; our simulation included the metal-electrolyte phase interfaces and took into account the MHD instability developing when replacing burnt-out anodes. We estimated how various initial crust configurations affect the MHD stability. We investigated how the process parameters affect the working space shape in the bath, which is a dynamic object, same as the metal-electrolyte interface and the reverse oxidation zone surface. We specifically studied the way changes in potential affect the MHD stable shape of the working space in the bath. We show that varying the potential between any given pair of anodes can change the shape of the working space, that is, crust melts as potential increases, while lowering potential leads to further accretion. As this happens, we note that there is an increase in the vibration magnitudes of the liquid metal and the lower reverse oxidation zone

Keywords

MHD stability, Söderberg electrolytic cell, interface, aluminium electrolysis, multi-anode electrolytic cell

boundary, but these variations are still within the range acceptable in terms of MHD stability of the electrolysis process

Received 25.03.2020

Accepted 06.04.2020

© Author(s), 2020

REFERENCES

- [1] Thonstad J., Fellner P., Haarberg G.M., et al. Aluminium electrolysis: fundamentals of the hall-heroult process. Düsseldorf, Aluminum, 2001.
- [2] Bojarevics V.V., Romerio M.V. Long waves instability of liquid metal-electrolyte interface in aluminium electrolysis cells: a generalization of Sele's criterion. *Eur. J. Mech. B/Fluids*, 1994, vol. 13, no. 1, pp. 33–56.
- [3] Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred*. Moscow, Nauka Publ., 1987.
- [4] Savenkova N.P., Anpilov S.V. [Two-phase 3D model of MHD stability of aluminum-mini electrolyzer]. *Tikhonovskie chteniya. Sb. tez.* [Proc. Tikhonov readings]. Moscow, MAKS Press Publ., 2011, pp. 70–71 (in Russ.).
- [5] Patankar S.V. *Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti* [Numerical methods for solving heat transfer and fluid dynamics problems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984.
- [6] Savenkova N.P., Kuz'min R.N., Anpilov S.V., et al. Mathematical modeling of influence of an electrolysis reduction cell shape on MHD processes. *Uspekhi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics], 2016, vol. 4, no. 4, pp. 409–415 (in Russ.).
- [7] Elizarova T.G., Milyukova O.M. Numerical simulation of viscous incompressible flow in a cubic cavity. *Comput. Math. Math. Phys.*, 2003, vol. 43, no. 3, pp. 433–445.
- [8] Stellingwerf R.F., Wingate C.A. Impact modelling with Smooth Particle Hydrodynamics. *Memorie della Società Astronomica Italiana*, 1994, vol. 65, pp. 1117–1128.
- [9] Savenkova N.P., Kuz'min R.N., Provorova O.G., et al. Two and three dimensional mathematical models of alumina electrolysis. *Dinamika slozhnykh sistem — XXI vek* [Dynamics of Complex Systems — XXI Century], 2009, no. 2, pp. 53–60 (in Russ.).
- [10] Belolipetskiy V.M., Piskazhova T.V. Mathematical simulation of electrolytic aluminum production process for solving the process control problems. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Universities' Proceedings. Nonferrous Metallurgy], 2013, no. 4, pp. 59–63 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2013-4-59-63>
- [11] Savenkova N.P., Anpilov S.V., Kuz'min R.N., et al. Reduction cell multiphase 3D model. *Prikladnaya fizika*, 2012, no. 3, pp. 111–115 (in Russ.).
- [12] Savenkova N.P., Shobukhov A.V., Anpilov S.V., et al. Mathematical modeling the physico-technological process of electro. *Prikladnaya fizika*, 2009, no. 6, pp. 43–51 (in Russ.).
- [13] Mohsen A., Désilets M., Proulx P. On the analysis of ionic mass transfer in the electrolytic bath of an aluminum reduction cell. *Can. J. Chem. Eng.*, 2014, vol. 92, no. 11, pp. 1951–1964. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.22047>

[14] Severo D.S., Gusberti V. A modelling approach to estimate bath and metal heat transfer coefficients. In: Essential readings in light metals. Springer, 2016, pp. 309–314.

[15] Severo D.S., Gusberti V., Pinto E.C.V., et al. Modeling the bubble driven flow in the electrolyte as a tool for slotted anode design improvement. In: Essential readings in light metals. Vol. 2. Springer, 2016, pp. 409–414.

Savenkova N.P. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Leading Research Fellow, Department of Computational Methods, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (Leninskie Gory 1, str. 3, Moscow, 119991 Russian Federation).

Mokin A.Yu. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Computational Methods, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (Leninskie Gory 1, str. 3, Moscow, 119991 Russian Federation).

Udovichenko N.S. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Department of Computational Methods, Faculty of Computational Mathematics and Cybernetics, Lomonosov Moscow State University (Leninskie Gory 1, str. 3, Moscow, 119991 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Savenkova N.P., Mokin A.Yu., Udovichenko N.S. Investigating magnetohydrodynamic stability of an aluminium electrolytic cell under various manufacturing process conditions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2020, no. 5, pp. 86–95 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2020-5-86-95>