

^{1,*}Кухарев А. Л., ²Мокрицкий М. И., ²Сбитнев С. А., ¹Яковенко Т. В.

¹Донбасский государственный технический университет,

²Южный горно-металлургический комплекс

*E-mail: alex.kuharev@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ И ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ В УСТАНОВКЕ «КОВШ-ПЕЧЬ»

Приведена математическая модель и результаты численных исследований электромагнитных процессов в трехфазной установке «ковш-печь» 300 т установленной мощностью 50 МВА. Проанализировано влияние электромагнитных сил на формирование электровихревых течений в расплавленной стали. Показано, что при токах в электродах 60 кА электровихревые течения будут доминировать в подэлектродной зоне, а максимальные значения скоростей могут достигать 1,5 м/с.

Ключевые слова: установка «ковш-печь», электромагнитное поле, электровихревые течения, моделирование.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. В настоящее время в технологии производства высококачественной стали установки «ковш-печь» (УКП) играют важную роль. В таких установках обеспечиваются условия для эффективной гомогенизации, дегазации и десульфурации, при этом все эти процессы во многом зависят от режимов перемешивания стали [1].

В УКП циркуляция жидкой стали происходит под воздействием следующих факторов: электромагнитных сил, возникающих вследствие протекания электрического тока и взаимодействия его с собственным магнитным полем (электровихревые течения), взаимодействия всплывающих пузырей инертного газа с расплавом при барботаже ванны газом, нагнетаемым через пористые блоки, расположенные в днище ковша или погружные фурмы; вязкого трения дуговой плазмы с поверхностью расплава. Как показано в работе [2], эти факторы оказывают существенное влияние на формирование сложного движения в системе «газ — металлический расплав».

В работе [3] исследовано влияние электромагнитных сил в УКП при токах в электродах порядка 10 кА, при этом вычислен-

ные значения максимальной скорости электровихревых течений составили 0,3 м/с.

В работе [2] исследовано влияние электромагнитных сил в УКП постоянного тока с осесимметрично расположенными электродами. Показано, что при токе в электродах 32,8 кА максимальная скорость движения стали в подэлектродной зоне составляет 1 м/с. Таким образом, с увеличением мощности УКП влияние электровихревых течений на циркуляцию стали увеличивается.

Постановка задачи. Отметим, что установленная мощность УКП (МВА) определяется мощностью электропечного трансформатора, а рабочая мощность (МВт) зависит от значений тока в электродах, напряжения на дугах и потребления реактивной мощности (коэффициента мощности). Установленная мощность современных УКП достигает 50 МВА при токах в электродах до 60 кА [4]. В связи со сложностью формирования электромагнитного поля в расплавленной стали при питании УКП от источника трехфазного напряжения, исследования мощных УКП являются актуальными.

В связи с этим *целью* настоящей работы является исследование электромагнитных сил в УКП установленной мощностью

50 МВА и их влияния на электровихревые течения жидкой стали с помощью метода математического моделирования.

Объект исследования — установка «ковш-печь».

Предмет исследования — электромагнитные и гидродинамические процессы в мощных трехфазных УКП.

Задачи исследования:

- разработка математической модели для расчета электромагнитных и гидродинамических полей;
- анализ динамики электромагнитных сил в жидкой стали при трёхфазном энергоснабжении;
- анализ структуры электровихревых течений в УКП.

Методика исследования. В качестве объекта моделирования была принята УКП емкостью 300 т. При построении модели рассматривалась только зона жидкой стали и воздействие на нее электрических дуг. Для этой зоны использовалось магнитогидродинамическое приближение, при котором рассматриваемые процессы описываются системой уравнений магнитной гидродинамики, при этом не учитывались химические реакции, процессы плавления и испарения, среды в пределах выделенных зон считались однородными, изотропными и немагнитными. Также не учитывалась поляризация, пренебрегалось влиянием токов смещения и диэлектрической проницаемостью, не учитывался перенос магнитного поля потоком электропроводной жидкости. На этом этапе считалось, что расплав находится в изотермических условиях, поэтому силы Архимеда не учитывались, также не учитывалось влияние шлакового слоя.

Электрические дуги представлялись в модели однородными цилиндрическими проводниками, располагаемыми в центрах поперечного сечения соответствующих электродов. Также предполагалось наличие вогнутых менисков в области расплава под электрическими дугами. Геометрические размеры электрических дуг и менисков

рассчитывались по методике, приведенной в работе [5]. Расчет электромагнитного поля проводился в пакете Ansys Maxwell, а гидродинамического поля — в пакете Star CCM+.

В гидродинамических расчетах в качестве основного источника импульса использовались электромагнитные силы.

Изложение материала. Геометрическая модель УКП представлена на рисунке 1.

Основные геометрические размеры модели: внутренний диаметр ковша в верхней части — 3780 мм, внутренний диаметр ковша в нижней части — 3162,4 мм, высота уровня металла — 3600 мм, диаметр мениска — 400 мм, глубина мениска — 54 мм, длина дуги — 300 мм, диаметр дуги — 128 мм.

Расчетная сетка для УКП содержала более 6 млн тетрагональных элементов, причем дополнительное сгущение сетки было выполнено в области менисков под электрическими дугами.

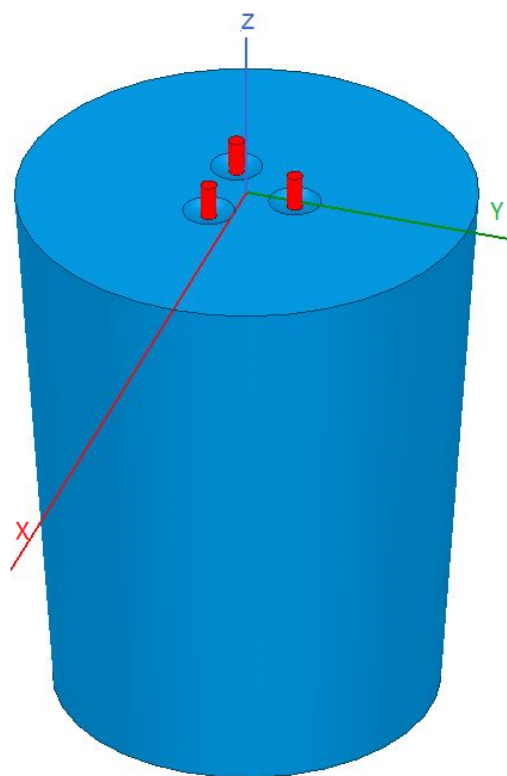


Рисунок 1 — Геометрическая модель УКП

При принятых допущениях базовые уравнения модели для расчета электромагнитного поля имеют вид:

– уравнение циркуляции электромагнитного поля:

$$\nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu_0} = \vec{J}, \quad (1)$$

– уравнение индукции:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2)$$

– уравнение Гаусса для магнитной индукции:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (3)$$

– закон Ома:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}, \quad (4)$$

– уравнение непрерывности электрического тока:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0, \quad (5)$$

где \vec{J} — плотность электрического тока, А/м²; \vec{B} — магнитная индукция, Тл; \vec{E} — напряженность электрического поля, В/м²; μ_0 — магнитная постоянная, Гн/м; σ — электропроводность, (Ом·м)⁻¹;

При питании У КП от источника переменного напряжения $u(t)$, не учитывая высшие гармонические составляющие токов и напряжений, электромагнитное поле будет изменяться по гармоническому закону с частотой $f=50$ Гц. Поэтому электромагнитную силу можно разделить на стационарную и гармоническую составляющие, причем гармоническая составляющая изменяется во времени с удвоенной частотой (рис. 2) [6]:

$$\vec{F}_{эм}(t) = \langle \vec{F}_{эм} \rangle + \vec{F}_{эм} \cdot \cos(2\omega t + \varphi), \quad (6)$$

где ω — угловая частота электромагнитного поля, рад/с; φ — сдвиг по фазе, эл. град., t — время, с.

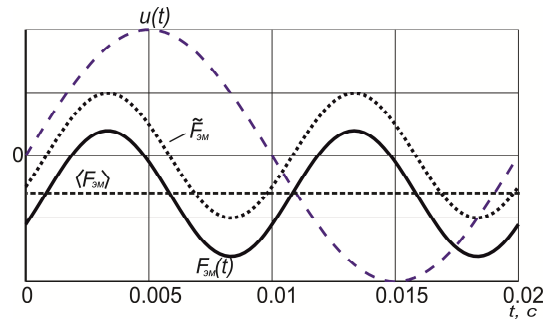


Рисунок 2 — График изменения во времени составляющих электромагнитных сил

В работе [6] показано, что жидкие металлы ввиду их большой инерции могут реагировать на гармоническую составляющую электромагнитной силы только при частотах $f < 4$ Гц. Таким образом, можно считать, что на расплав действует только стационарная ее составляющая:

$$\langle \vec{F}_{эм} \rangle = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left| \vec{J} \times \vec{B}^* \right|, \quad (7)$$

где \vec{B}^* — сопряженный вектор магнитной индукции, Тл;

Для расчета гидродинамического поля используем следующие уравнения:

– уравнение Навье — Стокса:

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p + \eta_s \nabla^2 \vec{v} + \vec{F}_{эм}, \quad (8)$$

– уравнение неразрывности потока:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad (9)$$

– уравнения $k - \varepsilon$ модели турбулентности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} k) = \\ = \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \varepsilon, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \\ + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (11)$$

– уравнение Колмогорова — Прандтля:

$$\eta_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (12)$$

где переменные модели: \bar{v} — скорость движения расплава, м/с; p — давление, Па; $\eta_s = \eta + \eta_T$ — эффективный коэффициент динамической вязкости, Па·с; k — турбулентная кинетическая энергия, м²/с²; ε — диссипация кинетической энергии турбулентности, м²/с³; G_k — специфическая генерация турбулентности от средних градиентов скорости, Вт/м³; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_μ , σ_k , σ_ε — постоянные модели турбулентности.

Моделирование проводилось при следующих свойствах жидкой стали: плотность $\rho = 7000$ кг/м³, динамическая вязкость $\eta = 0,007$ Па·С, удельная электропроводность $\sigma = 7,14 \cdot 10^5$ (Ом·м)⁻¹ [7].

Граничные условия, используемые при расчете электромагнитного поля подробно описаны нами в монографии [5]. При расчете гидродинамического поля на всех внешних границах расплава (стенках) задавалось условие прилипания: $\bar{v}|_2 = 0$.

Результаты моделирования распределения сил Лоренца в вертикальных и горизонтальных сечениях УКП приведены на рисунке 3.

Наибольшие значения плотности силы Лоренца наблюдаются вблизи зоны контакта расплава с дугой ($7,7 \cdot 10^5$ Н/м³). По мере удаления от электрических дуг вглубь расплавленной стали и в сторону боковых стенок значения электромагнитных сил резко уменьшаются, что обусловлено особенностями распространения электромагнитного поля в проводящей среде. Основное направление электромагнитных сил — от поверхности вглубь расплава.

Результаты моделирования распределения скорости потоков в УКП приведены на рисунках 4 и 5.

Как видно из рисунков, структура течений в расплаве достаточно сложная. В зоне под электрическими дугами формируются

мощные струи расплава, направленные к днищу ковша.

Максимальная скорость в струе расплава достигает 1,5 м/с. В нижней части ковша расплав растекается к периферии со скоростями ~0,2 м/с и далее медленно поднимается вдоль стенок на поверхность и направляется к соответствующей области электрической дуги, где вновь вовлекается электромагнитными силами вглубь расплава.

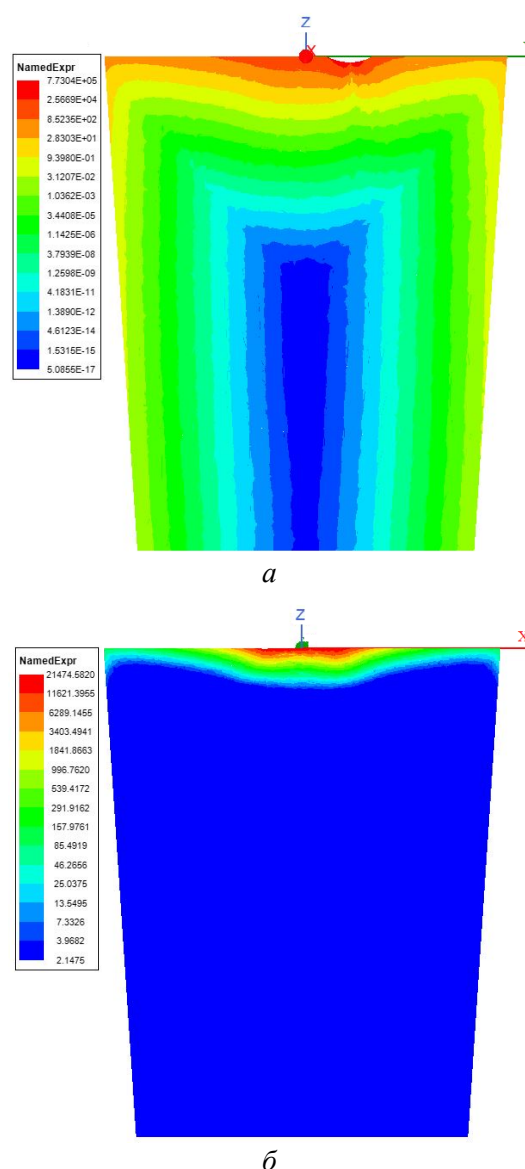
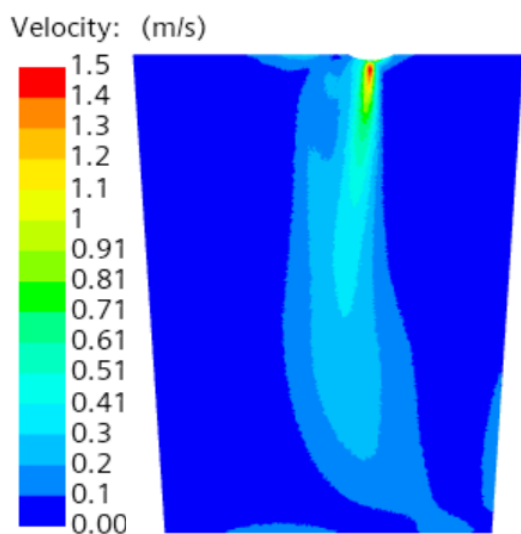
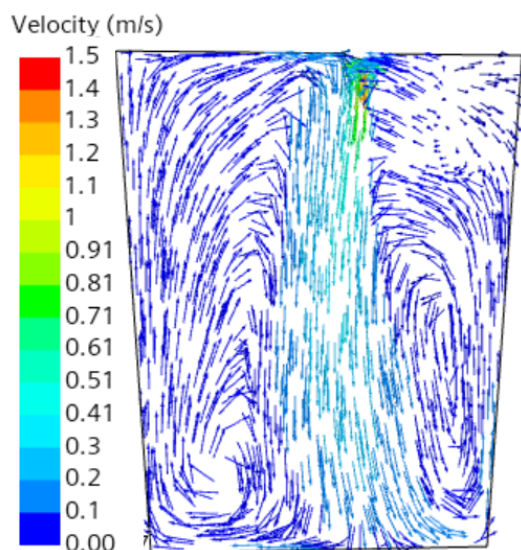


Рисунок 3 — График распределения постоянной составляющей плотности электромагнитной силы в УКП: а — в сечении, проходящем через ось Y; б — в сечении, проходящем через ось X



a



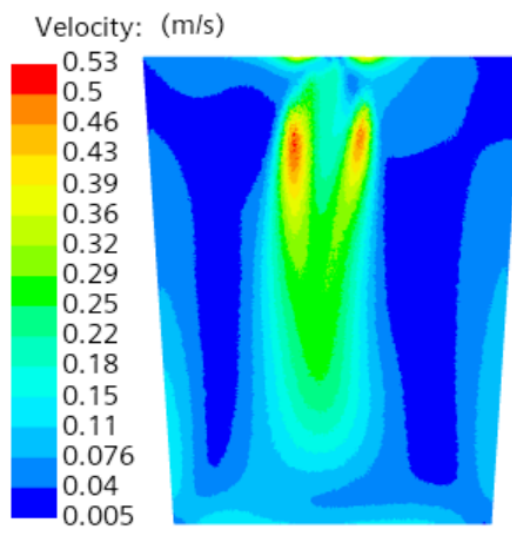
б

a — контурный график; *б* — векторный график

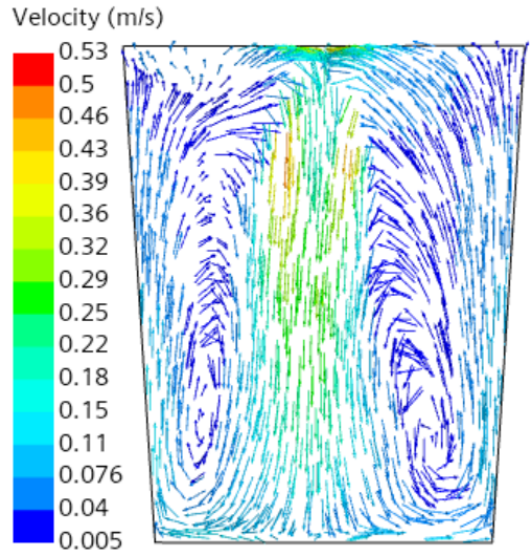
Рисунок 4 — График распределения скорости в сечении УКП, проходящем через ось *Y*

В сечении, проходящем через ось *X*, имеются два максимума скорости ($\sim 0,53$ м/с), что обусловлено влиянием электромагнитных сил, формируемых от двух электрических дуг.

Также вблизи поверхности расплава наблюдается некоторая азимутальная закрутка, вызывающая течение в горизонтальной плоскости со скоростями $\sim 0,1$ м/с.



a



б

a — контурный график; *б* — векторный график

Рисунок 5 — График распределения скорости в сечении УКП, проходящем через ось *X*

Выполненные исследования позволили сделать следующие **ВЫВОДЫ**:

1. В результате проведённых исследований методом математического моделирования уточнены закономерности формирования электровихревых течений в УКП 300 т установленной мощностью 50 МВА.

2. Показано, что при токах в электродах 60 кА электровихревые течения будут доминировать в подэлектродной зоне, а мак-

симальные значения скоростей могут достигать 1,5 м/с.

3. Нисходящие контуры циркуляции расплава в области электрических дуг бу-

дут оказывать влияние на восходящие потоки, формируемые вследствие донной продувки на УКП аргоном, что и является перспективой дальнейших исследований.

Список источников

1. *Mixing Time Prediction in a Ladle Furnace / X. Guo [et al.] // Metals. 2024. Vol. 14. № 5. DOI: 10.3390/met14050518*
2. *Численное исследование гидродинамики расплава в установке ковши-печь постоянного тока / И. В. Крикент [и др.] // Современная электрометаллургия. 2014. № 3. С. 45–49.*
3. *Оценка величины и влияния электромагнитных сил в ванне установки ковши-печь переменного тока / В. П. Питтук [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 9. С. 40–44.*
4. *Кузнецов Д. Ю. Промышленное опробование новой технологии десиликонизации малокремнистой автолистовой стали в АКП // Сб. науч. тр. ДонГТУ. 2013. Вып. 40. С. 109–115.*
5. *Кухарев А. Л. Электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы в многоэлектродных печных установках : монография. Луганск : изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2021. 276 с.*
6. *Numerical modeling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field: Part I. Implementation and verification of model / S. Spitanis, A. Jakovics, E. Baake, B. Nacke // Metallurgical and Materials Transactions B. 2013. Vol. 44B. P. 593–605. DOI: 10.1007/s11663-013-9809-9*
7. *Арсентьев П. П., Коледов Л. А. Металлические расплавы и их свойства. М. : Металлургия, 1976. 376 с.*

© Кухарев А. Л., Яковенко Т. В.

© Мокрицкий М. И., Сбитнев С. А.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Куберским С. В.,
начальником патентного отдела ООО «ЮГМК» Великоцким Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 14.10.20204.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кухарев Алексей Леонидович, д-р техн. наук, профессор каф. автоматизированного управления и инновационных технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия,
e-mail: alex.kuharev@mail.ru

Мокрицкий Максим Игоревич, исполнительный директор
Южный горно-металлургический комплекс (ООО «ЮГМК»),
г. Алчевск, Россия

Сбитнев Сергей Анатольевич, главный инженер
Южный горно-металлургический комплекс (ООО «ЮГМК»),
г. Алчевск, Россия

Яковенко Татьяна Викторовна, д-р пед. наук, профессор каф. автоматизированного управления и инновационных технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

***Kukharev A. L.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: alex.kuharev@mail.ru), **Mokrickiy M. I., Sbitnev S. A.** (Southern Mining and Metallurgical Complex, Alchevsk, Russia), **Yakovenko T. V.** (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia)

MODELING OF ELECTROMAGNETIC FORCES AND ELECTRIC VORTEX FLOWS IN A LADLE FURNACE

The mathematical model and results of numerical investigations of electromagnetic processes in a three-phase ladle-furnace of 300 tons with an installed capacity 50 MVA are presented. The influence of electromagnetic forces on the formation of electric vortex flows in molten steel is analyzed. It is shown that at electrode flows of 60 kA, electric vortex flows dominate in the sub-electrode zone, and the maximum velocity values can reach 1,5 m/s.

Key words: ladle furnace, electromagnetic field, electric vortex currents, modeling.

References

1. X. Guo [et al.] Mixing Time Prediction in a Ladle Furnace. *Metals*. 2024. Vol. 14. No. 5. DOI: 10.3390/met14050518
2. Krikent I. V. [et al.] Numerical study of melt hydrodynamics in a DC ladle furnace [Chislennoe issledovanie gidrodinamiki rasplava v ustanovke kovsh-pech' postoyannogo toka]. *Sovremennaya elektrometallurgiya*. 2014. No. 3. Pp. 45–49. (rus)
3. Piptyuk V. P. [et al.] Assessing the magnitude and influence of electromagnetic forces in an AC ladle furnace bath [Oценка velichiny i vliyaniya elektromagnitnyh sil v vanne ustanovki kovsh-pech' peremennogo toka]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaya metallurgiya*. 2014. Vol. 57. No. 9. Pp. 40–44. (rus)
4. Kuznetsov D. Yu. Industrial testing of a new technology of desiliconization of low-silicon auto sheet steel in ACP [Promyshlennoe oprobovanie novoy tekhnologii desilikonizatsii malokremnistoj avtolistovoj stali v AKP]. *Scientific works collection of DonSTU. Iss. 40. Alchevsk*. 2013. Pp. 109–115. (rus)
5. Kukharev A. L. *Electromagnetic, hydrodynamic and thermal processes in multi-electrode furnace installations : a monograph [Elektromagnitnye, gidrodinamicheskie i teplovye processy v mnogoelektroodnyh pechnykh ustanovkakh : monografiya]*. Lugansk : izd-vo LGU im. V. Dalya, 2021. 276 p. (rus)
6. Spitsans S., Jakovics A., Baake E., Nacke B. Numerical modeling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field: Part I. Implementation and verification of model. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2013. Vol. 44B. Pp. 593–605. DOI: 10.1007/s11663-013-9809-9
7. Arsentiev P. P., Koledov L. A. *Metallic melts and their properties [Metallicheskie rasplavy i ih svojstva]*. M. : Metallurgiya, 1976. 376 p. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kukharev Aleksey Leonidovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation Management and Innovation Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia,
e-mail: alex.kuharev@mail.ru

Mokrickiy Maksim Igorevich, Executive Director
Southern Mining and Metallurgical Complex (OOO YuGMK)
Alchevsk, Russia

Sbitnev Sergey Anatolievich, Chief Engineer
Southern Mining and Metallurgical Complex (OOO YuGMK)
Alchevsk, Russia

Yakovenko Tatiana Viktorovna, Doctor of Education, Professor of the Department of Automation Control and Innovation Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia