

УДК 004.9 + 517.2

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
В СЛОЕ РАФИНИРОВОЧНОГО ШЛАКА В АГРЕГАТАХ ПЕЧЬ-КОВШ***Зацепин Е.П., к.т.н., доцент кафедры электрооборудования (ezats@mail.ru)**Галкин А.В., к.т.н., доцент, зав. кафедрой прикладной математики (avgalkin82@mail.ru)***Липецкий государственный технический университет**
(398600, Россия, Липецк, ул. Московская, 30)

Аннотация. Рассмотрен вопрос моделирования распределения электромагнитного поля в слое рафинировочного шлака для уточнения рационального электрического режима работы агрегатов печь-ковш. Представлен вывод математической модели для напряженности электрического поля в слое шлака. Получена зависимость удельного сопротивления металлургических шлаков от их основности и температуры расплава. Построена разностная схема для решения дифференциального уравнения, являющегося математической моделью распределения напряженности электрического поля. Получено решение дифференциального уравнения, описывающего распределение напряженности электрического поля. Приведены примеры распределения напряженности электрического поля в слое шлака на различных высотах от зеркала металла. Результаты математического моделирования, полученные в работе, показали хорошую сходимость с результатами физического моделирования.

Ключевые слова: электрический режим, моделирование, дифференциальное уравнение, разностные схемы, электродуговая печь переменного тока, метод последовательных приближений, электроплавка, электротермия.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-7-496-500

Регулирование электрического режима дуговой сталеплавильной печи (ДСП) ведется по напряжению и току дуги. Наиболее рациональным режимом работы для этих агрегатов является режим максимальной интенсивности нагрева металла. Для агрегатов печь-ковш (АПК) регулирование режима по току дуги сопряжено с трудностями, так как часто они работают с дугой, экранированной шлаком. В этом случае, при перекрытии электродов проводящим шлаком, в последнем протекают токи, шунтирующие электрические дуги. При этом для определения рациональных значений токов дуг, соответствующих максимальной интенсивности нагрева металла и не опасных для футеровки, необходимо учитывать токи в слое рафинировочного шлака [1]. Для эффективного функционирования АПК на первом этапе при формировании рафинировочного шлака, определенного состава для группы сталей, обеспечивается заданная толщина слоя шлака на зеркале металла, которая соответствует установленной длине дуги. Это позволяет достичь оптимальной скорости нагрева металла. Слой рафинировочного шлака должен быть на 20 – 30 % больше длины дуги, чтобы обеспечить эффективное экранирование открытой дуги шлаком. Если толщина шлака превысит этот показатель в 2,5 – 3 раза, то из-за высокой электропроводности шлака дуги могут быть полностью шунтированы, что резко ухудшает нагрев металла и вызывает нежелательное разложение фториды кальция с образованием карбида кальция. При толщине слоя шлака меньше длины дуги растут потери подаваемой мощности, перегревается крышка пе-

чи-ковша. В случае работы с дугой, длина которой на 10 мм не закрыта шлаком, потери составляют ~ 2 – 3 % подводимой мощности, поскольку температура столба дуги составляет 4500 – 6000 °С, а передача тепла излучением пропорциональна четвертой степени от температуры [2]. Практика показывает, что для эффективной работы АПК средней мощности (100 – 150-т ковш) длина дуги составляет 60 – 90 мм, в этом случае при оптимальной толщине слоя шлака дуги замыкаются через металл, обеспечивая оптимальный нагрев (рис. 1).

Однако при расчете оптимального электрического режима необходимо учитывать шунтирование шлаком дуг, что можно получить при анализе распределения тока в слое шлака. Для определения сопротивления слоя рафинировочного шлака необходимо последний рассматривать как массивный проводник. В соответствии с основами теории электромагнитного поля при исследовании распределения токов в проводящей среде можно пренебречь токами смещения в силу их малости в сравнении с токами проводимости, т. е. приняв $\partial D/\partial t = 0$. В этом случае уравнения Максвелла принимают вид

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H &= J + \gamma E; \\ \operatorname{rot} E &= -\mu_a \frac{\partial H}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где H – вектор напряженности магнитного поля; E – вектор напряженности электрического поля; γ – удельная электрическая проводимость среды; μ_a – магнитная проницаемость среды [3].

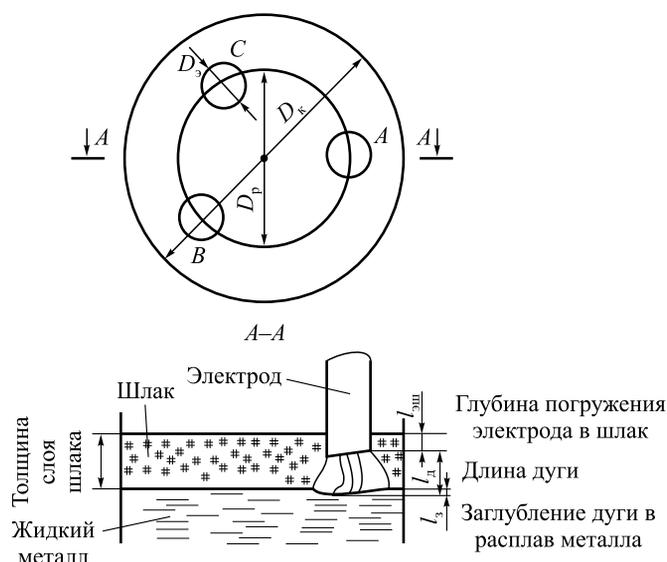


Рис. 1. Схема горения дуги в АПК при экранировании ее шлаком

Fig. 1. The scheme of the arc in the electric arc furnace at the shielding of slag

Если рассматривать плоскую электромагнитную волну, распространяющуюся в декартовой системе координат вдоль оси Oz , направив при этом вектор E по оси Ox , а вектор H по оси Oy с учетом того, что напряженности электрического и магнитного полей будет изменяться по синусоидальным законам с угловой частотой ω : $E_x = E_m \sin(\omega t + \varphi_e)$; $H_y = H_m \sin(\omega t + \varphi_n)$, где φ_e , φ_n – начальные фазы колебаний напряженностей электрического и магнитного полей, то первое и второе уравнения Максвелла могут быть записаны в комплексной (символической) форме записи

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \dot{H} &= \gamma \dot{E}; \\ \operatorname{rot} \dot{E} &= -j\omega\mu_a \dot{H}, \end{aligned} \quad (2)$$

где j – мнимая единица.

Для совместного решения уравнений (2) возьмем ротор от первого уравнения в системе (2) с учетом того, что $\operatorname{div} \dot{E} = 0$ и $\operatorname{div} \dot{H} = 0$:

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \dot{H} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \dot{H} - \nabla^2 \dot{H} = \gamma \operatorname{rot} \dot{E}.$$

Подставив вместо $\operatorname{rot} \dot{E} - j\omega\mu_a \dot{H}$, получим

$$\nabla^2 \dot{H} - j\omega\gamma\mu_a \dot{H} = 0. \quad (3)$$

Аналогичную запись можно получить для напряженности электрического поля:

$$\nabla^2 \dot{E} - j\omega\gamma\mu_a \dot{E} = 0. \quad (4)$$

Распределение тока в массивном проводнике будет подчиняться закону Ома в интегрально-дифференциальной форме $J = \gamma E$ [4]. Поскольку питание АПК

осуществляется трехфазным переменным напряжением, а система электродов строго симметрична, то при решении уравнения (4) в качестве граничных условий можно перейти от напряженности электрического поля к напряжению в расчетных точках рассматриваемого массивного проводника.

Для численного решения поставленной задачи необходимо знать удельную электрическую проводимость слоя шлака и его магнитную проницаемость. Если с магнитной проницаемостью шлака проблем не возникает, так как шлак не является ферромагнитным веществом, то с достаточной для инженерных расчетов точностью магнитную проницаемость шлака можно принять равной магнитной проницаемости вакуума, которая равна единице, поскольку отличие магнитной проницаемости для диамагнитных и парамагнитных веществ от магнитной проницаемости вакуума составляет величину порядка $\pm 0,001\%$. Электропроводность слоя шлака определяется его химическим составом и температурой. На АПК рафинирование производится двумя видами шлаков: известково-глиноземистым и известково-силикатным, химический состав которых приведен в таблице [5].

Увеличение основности шлака, которое соответствует увеличению концентрации основных оксидов (CaO , FeO , MgO) по сравнению с концентрацией кислотных оксидов (SiO_2), снижает сопротивление шлака и уменьшает градиент напряжения столба дуги [6, 7]. В результате увеличивается длина дуги и тепловая нагрузка на стенки ковша и свод АПК. В работе [8] приведены изотермы удельной электропроводности известково-силикатных расплавов в зависимости от процентного содержания негашеной извести в расплаве. При пересчете этих изотерм в зависимости удельного сопротивления от основности шлака получено семейство кривых, которые были аппроксимированы зависимостями. Ошибка интерполирования составила величину менее 4%. В результате была получена зависимость удельного сопротивления металлургических шлаков от их основности и температуры расплава, представленная на рис. 2.

Химический состав применяемых шлаков

Table. The chemical composition of the used slags

Компонент	Массовая доля компонента в шлаке, %	
	известково-глиноземистый	известково-силикатный
CaO	55 – 65	55 – 65
Al ₂ O ₃	20 – 30	8 – 10
SiO ₂	8 – 10	20 – 30
MgO	5 – 8	5 – 8
MnO + FeO	≤ 1	≤ 1
CaF ₂	–	6 – 8

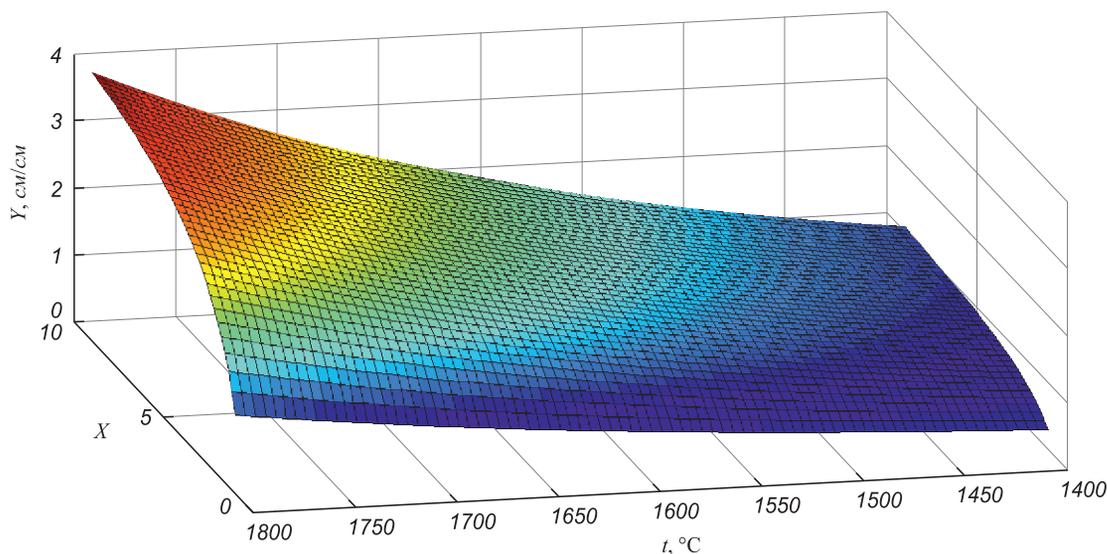


Рис. 2. Зависимость удельной проводимости шлака от его основности и температуры расплава

Fig. 2. Dependence of the resistivity of metallurgical slags from their core and melt's temperature

Для решения уравнения (4), представляющего собой эллиптическое уравнение, была построена разностная схема [9], которая включает в себя дискретизацию исходного дифференциального уравнения

$$\frac{U_{i+1,l,k} - 2U_{i,l,k} + U_{i-1,l,k}}{h_1^2} + \frac{U_{i,l+1,k} - 2U_{i,l,k} + U_{i,l-1,k}}{h_2^2} + \frac{U_{i,l,k+1} - 2U_{i,l,k} + U_{i,l,k-1}}{h_1^2} - j\omega\gamma\mu_a U_{i,l,k} = 0, \quad (5)$$

где i, l, k – индексы разбиения по осям Ox, Oy, Oz соответственно; $U_{i,l,k}$ – значение напряжения в узле сетки (i, l, k) ; h_1 – шаг разбиения по осям Ox и Oz ; h_2 – шаг разбиения по оси Oy .

В качестве граничных условий задаются функции напряжений на электродах $U_A(t) = U_{Am} \sin(\omega t + \varphi_A)$, $U_B(t) = U_{Bm} \sin(\omega t + \varphi_B)$, $U_C(t) = U_{Cm} \sin(\omega t + \varphi_C)$, где U_{Am}, U_{Bm}, U_{Cm} – амплитуды напряжений на электродах A, B и C ; $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – начальные фазы напряжений на электродах A, B и C .

Получаемая из (5) система линейных уравнений в связи с большой размерностью (исходная область была разбита на 15 376 точек) решалась итерационным методом последовательного приближения [10, 11] по формуле

$$U_{i,l,k}^{(n+1)} = \left(\frac{U_{i+1,l,k}^{(n)} + U_{i-1,l,k}^{(n)} + U_{i,l+1,k}^{(n)} + U_{i,l,k-1}^{(n)}}{2(2h_2^2 + h_1^2)} h_2^2 + \frac{U_{i,l+1,k}^{(n)} + U_{i,l-1,k}^{(n)}}{2(2h_2^2 + h_1^2)} h_1^2 \right) / \left(1 - j\omega\gamma\mu_a \frac{h_1^2 h_2^2}{2(2h_2^2 + h_1^2)} \right), \quad (6)$$

где $U_{i,l,k}^{(n)}$ – уточненное значение напряжения в узле сетки (i, l, k) на n -ном шаге.

Шаг по осям Ox и Oz составил $h_1 = 0,1$ м, по оси Oy $h_2 = 0,01$ м. Полученные решения для времени 0,04 с представлены на рис. 3.

На рис. 4 приведены следы тока, полученные при физическом моделировании распределения тока в трехэлектродной ванне трехфазной печи при треугольном расположении электродов диаметром 3,2 см при их погружении в расплав [12]. Сравнение результатов математического и физического моделирования говорит об их хорошей сходимости.

Одним из основных показателей работы ДСП и АПК в период доводки металла является скорость нагрева металла $v_n, ^\circ\text{C}/\text{мин}$. Экспериментально установлено, что этот параметр пропорционален коэффициенту интенсивности нагрева $k_{и.н.}$, который равен произведению тока дуги на выделяемую в ней активную мощность. Зависимость v_n от $k_{и.н.}$ будет одинаковой для печей различной мощности при одинаковой емкости [13]. Зависимость $k_{и.н.}$ от величины тока электрода I_3, kA , по которому ведется управление режимом плавки, является экстремальной, при этом максимум наблюдается при меньших значениях $\cos\phi$ и больших значениях тока I_3 [14, 15]. Поэтому предлагается на рассматриваемых стадиях плавки выбирать режим работы печного агрегата, исходя из максимума $k_{и.н.}$ и работать на соответствующих токе и напряжении дуги. Однако рассматриваемые подходы учитывают слой шлака только как теплоизолирующую среду, которая способствует передаче энергии дуг только металлу. Фактически за счет того, что шлак обладает конечным активным электрическим сопротивлением, он участвует в распределении электрической мощности внутри печи, т. е. часть тока электродов будет ответвляться в шлак и расходоваться на его нагрев. Регулирование электрического режима работы электропечи осуществляется по току электро-

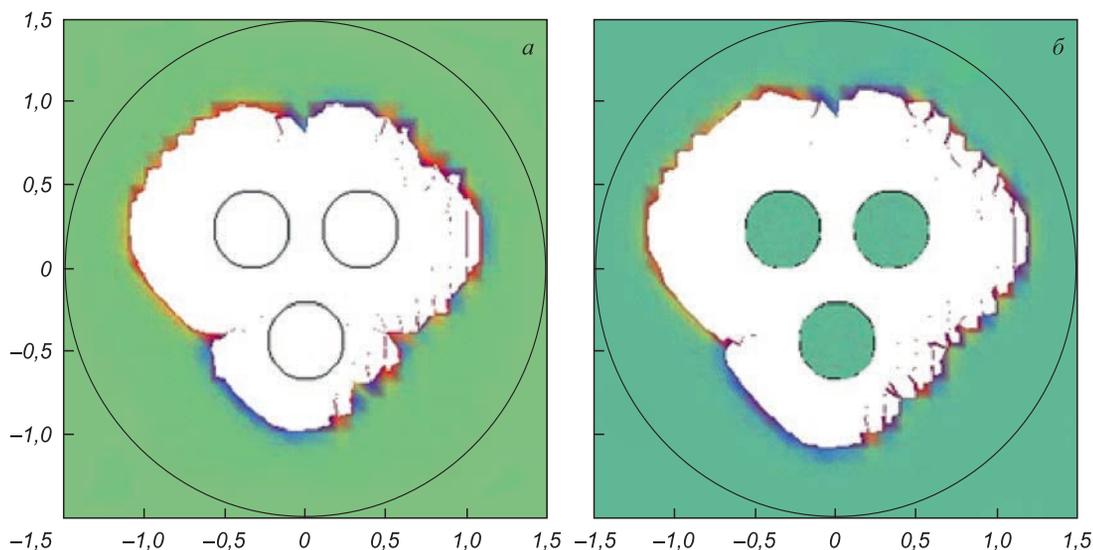


Рис. 3. Распределение значений напряжения на различных высотах от зеркала металла, см:
а – 10; б – 6

Fig. 3. Distribution of the voltages at various heights from the mirror of metal, cm:
а – 10; б – 6

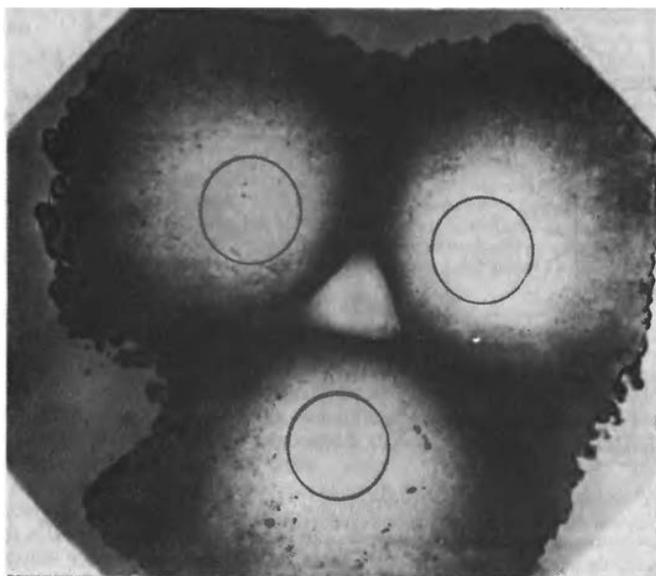


Рис. 4. Следы тока, полученные при физическом моделировании

Fig. 4. Traces of the current obtained by physical modeling

дов и напряжению дуги без учета токов, отводимых в шлак при шунтировании последним электрических дуг. Для учета этих токов необходимо моделировать распределение токов в слое рафинировочного шлака, которое зависит от таких управляемых параметров, как высота погружения электродов в шлак и ступени напряжения печного трансформатора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зацепин Е.П. К вопросу об эффективности функционирования дуговых сталеплавильных печей переменного тока // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2012. № 2. С. 23 – 29.

2. Зацепин Е.П. Анализ неустойчивости дуговых процессов при работе дуговой электропечи // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2014. № 4. С. 18 – 21.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Гардарики, 2003. – 317 с.
4. Шпиганович А.Н., Зацепина В.И. Особенности распределения напряжения по поверхности аппаратных изоляторов // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2008. № 1. С. 7 – 10.
5. Дюкин Д.А., Бать С.Ю., Гринберг С.Е., Маринцев С.Н. Производство стали на агрегате печь–ковш. – Донецк: ООО «Юго-Восток Лтд», 2003. – 300 с.
6. Микулинский А.С. Процессы рудной электротермии. – М.: Металлургия, 1966. – 280 с.
7. Зацепина В.И., Корченова Т.А. Оценка коэффициента мощности руднотермических печей ферросплавных производств // Промышленная энергетика. 2008. № 4. С. 49 – 52.
8. Петров Г.А., Тумарев А.С. Теория сварочных процессов. – М.: Высшая школа, 1977. – 392 с.
9. Самарский А.А. Теория разностных схем. – 2-е изд. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
10. Калиткин Н.Н. Численные методы. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 586 с.
11. Вержбицкий В.М. Численные методы. Математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения: Уч. пособие. – М.: Высшая школа, 2001. – 384 с.
12. Струнский Б.М. Расчеты руднотермических печей. – М.: Металлургия, 1982. – 192 с.
13. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей – М.: Металлургия, 1981. – 320 с.
14. Шпиганович А.Н., Зацепин Е.П., Ищенко А.Е. Выбор оптимального электрического режима электропечных агрегатов путем уточненного определения интегральных показателей их работы // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2012. № 3. С. 29 – 36.
15. Зацепина В.И. Обеспечение безотказности систем электроснабжения промышленных предприятий за счет новых средств компенсации негативных факторов: Дис. ... д-ра техн. наук. – Липецк: ЛГТУ, 2014. – 432 с.

Поступила 3 декабря 2014 г.

MODELING OF DISTRIBUTION OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN THE SLAG'S LAYER AT LADLE FURNACE

Zatsepin E.P., *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of electrical equipment (ezats@mail.ru)*

Galkin A.V., *Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor, Head of the Chair of applied mathematics (avgalkin82@mail.ru)*

Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya str., Lipetsk, 398600, Russia)

Abstract. The paper discusses the modeling of electromagnetic field distribution in the conductor layer of slag to clarify the rational electric mode of the electric arc furnace. The conclusion of the mathematical modeling for the electric field in the slag layer is presented. The obtained dependence of the resistivity of metallurgical slags is submitted from their core and melt's temperature. The difference scheme for the solution of differential equations was built, which is a mathematical model of the distribution of the electric field. The authors have obtained the solution of the differential equation describing the distribution of the electric field, using the Picard method of successive approximations. The examples of the electric field distribution in the slag layer at different heights from the surface of the metal are represented. The results of mathematical modeling obtained in this work showed good agreement with the results of physical modeling.

Keywords: electric mode, modeling, differential equation, finite difference schemes, AC electric arc furnace, method of successive approximations, electrofusion, electroheat.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-7-496-500

REFERENCES

- Zatsepin E.P. To a question of the effectiveness of EAFAC. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2012, no. 2, pp. 23–29. (In Russ.).
- Zatsepin E.P. Analysis of instability of arc processes at work of arc furnace. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2014, no. 4, pp. 18–21. (In Russ.).
- Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektromagnitnoe pole. Uchebnik* [Theoretical foundations of electrical engineering. The electromagnetic field. Textbook.]. Moscow: Gardariki, 2003. 317 p. (In Russ.).
- Shpiganovich A.N., Zatsepina V.I. The features of voltage distribution in the hardware surface of insulators. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2008, no. 1, pp. 7–10. (In Russ.).
- Dyukin D.A., Bat' S.Yu., Grinberg S.E., Marintsev S.N. *Proizvodstvo stali na agregate pech'-kovsh* [Steel production in the ladle-furnace unit]. Donetsk: OOO "Yugo-Vostok Ltd", 2003. 300 p. (In Russ.).
- Mikulinskii A.S. *Protsessy rudnoi elektrotermii* [Processes of ore electrothermics]. Moscow: Metallurgiya, 1966. 280 p. (In Russ.).
- Zatsepina, V.I., Korchenova T.A. Evaluation of the power factor of ore-smelting furnace for ferroalloy production. *Promyshlennaya energetika*. 2008, no. 4, pp. 49–52. (In Russ.).
- Petrov G.A., Tumarev A.S. *Teoriya svarochnykh protsessov* [Theory of welding processes]. Moscow: Vysshaya shkola, 1977. 392 p. (In Russ.).
- Samarskii A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow: Nauka, 1983. 616 p. (In Russ.).
- Kalitkin N.N. *Chislennye metody* [Numerical methods]. St. Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011. 586 p. (In Russ.).
- Verzhbitskii V.M. *Chislennye metody. Matematicheskii analiz i obyknovennye differentsial'nye uravneniya. Uch. posob.* [Numerical methods. Mathematical analysis and ordinary differential equations. Manual]. Moscow: Vysshaya shkola, 2001. 384 p. (In Russ.).
- Strunskii B.M. *Raschety rudnotermicheskikh pechei* [Calculations of ore-smelting furnaces]. Moscow: izd-vo Metallurgiya, 1982. 192 p. (In Russ.).
- Nikol'skii L.E., Smolyarenko V.D., Kuznetsov L.N. *Teplovaya rabota dugovykh staleplavil'nykh pechei* [Thermal work of EAF]. Moscow: Metallurgiya, 1981. 320 p. (In Russ.).
- Shpiganovich A.N., Zatsepin E.P., Ishchenko A.E. Selection of the optimal electric mode of electric furnace units by clarifying the definition of integrated indicators of their work. *Vesti vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya*. 2012, no. 3, pp. 29–36. (In Russ.).
- Zatsepina V.I. *Obespechenie bezotkaznosti sistem elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatii za schet novykh sredstv kompensatsii negativnykh faktorov: dis. d-ra tekhn. nauk* [Ensuring the reliability of power supply systems of industrial enterprises at the expense of new funds of offset of the negative factors: Dr. Sci. (Eng.) Diss.]. Lipetsk: LGTU, 2014. 432 p. (In Russ.).

Received December 3, 2014