

ция с полной автоматизацией и внедрением системы АСУ ТП. Все сигналы о составе смеси, ее калорийности и количестве выведены на пульт управления печью, который находится в реконструируемом помещении КИПиА в непосредственной близости от нагревательной печи.

Всего на печи установлено 18 горелок типа ГД-200 («СПД Сульга В. И.») (табл. 1). Эти горелки работают на коксо доменной смеси с давлением 4000 Па и подогретом до 350 °С воздухе. Расход газа на печь составляет 7600 нм³/ч. Тепловая мощность печи – 20 млн ккал/ч.

Таблица 1

Распределение тепловой мощности и температура сварочных зон отопления

Наименование зоны	Тепловая мощность зоны печи, %	Количество горелок типа ГД-200, шт.	Температура по зонам, °С
I – сварочная верхняя	30	6 – боковые	1320
II – сварочная нижняя	45	4 – боковые 4 – торцевые	1280–1320
III – томильная	25	4 – торцевые	1280–1300

Выводы

Проект модернизации печи, разработанный ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», обеспечит: повышение тепловой мощности печи до 20 млн ккал/ч при производительности до 40 т/ч; повышение качества нагрева заготовок, снижение расхода природного газа с 300 нм³/ч до 4 нм³/ч (только на розжиг горелок); повышение температуры подогрева воздуха до 350 °С; увеличение межремонтных сроков эксплуатации печи.

Поступила 08.09.2015



УДК 661.666:66.096.5

Производство

**С. С. Федоров /к. т. н./, В. А. Безуглый,
М. В. Губинский /д. т. н./,
Е. В. Кремнева /к. т. н./**

Национальная металлургическая академия
Украины

Исследование удельного электрического сопротивления углеродсодержащих материалов в плотном и кипящем слое

На основе сопоставления известных моделей проводимости зернистых структур и экспериментальных данных показано, что зависимость УЭС от давления и размера частиц вида $\Omega = C \cdot P^m \cdot d^n$ является адекватной, а также эффективной с точки зрения построения и применения. С использованием данного подхода выполнена обработка результатов экспериментальных исследований по определению УЭС порошка электродного графита. (Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 17 назв.).

Ключевые слова: углеродсодержащий материал, электротермическая печь, плотный и кипящий слой, удельное электрическое сопротивление

Based on a comparison of the known models of granular structures conductivity and the experimental data shows that the dependence of the specific electrical resistivity on pressure and the particle size of the form $\Omega = C \cdot P^m \cdot d^n$ is adequate, as well as being effective in terms of construction and application. Using this approach, processed results of experimental studies to determine there sistivity of the electrode graphite powder.

Key words: carbonaceous materials, electro thermal furnace, dense and fluidized bed, the specific electric resistance

© С. С. Федоров /к. т. н./, В. А. Безуглый, М. В. Губинский /д. т. н./, Е. В. Кремнева /к. т. н./, 2015 г.

Состояние вопроса об электрической проводимости насыпных слоев

Исследование электротермических агрегатов для производства углеродистых материалов показало необходимость дополнительного изучения процесса тепловыделения при прямом электронагреве слоев насыпных электропроводных материалов. Так, электрокальцинаторы плотного слоя характеризуются выраженной неравномерностью хода: до 60–70 % тепловой мощности выделяется в электродной зоне, по высоте образуются каналы повышенной плотности тока и температуры [1–3]. Как результат – неудовлетворительное качество готовой продукции. В работе печей электротермического кипящего слоя открытыми остаются вопросы понимания физики переноса электрического заряда, что усложняет создание адекватных математических моделей, а также вопросы конструирования и управления печами [4–6]. Наиболее вероятным механизмом электропроводности кипящего слоя считается наличие цепочек (каркаса) из ограниченного числа локальных во времени контактов частиц «эмульсионной» фазы в рамках двухфазной модели кипящего слоя [7]. Это характерно для неоднородных кипящих слоев и подтверждается отдельными экспериментами [4; 7].

В тепловой работе электротермических печей как плотного, так и кипящего слоя особую роль играет электрическое сопротивление дисперсного материала. В общем случае сопротивление является интегральной характеристикой, зависящей от профиля рабочего пространства, ориентации электродов и проводимости слоя [1; 5; 8]. В свою очередь, проводимость зернистых структур также может изменяться в широких пределах как в объеме печи, так и во времени. Она напрямую связана с температурой, свойствами слоя и материала (насыпной плотностью, гранулометрическим составом материала и т. п.), а также внешней механической нагрузкой на слой [4; 8–12]. В печах кипящего слоя дополнительным фактором выступает режим псевдооживления.

Процессы электротермического нагрева в плотном и кипящем слое во многом схожи между собой и могут быть представлены на основе контактной модели проводимости с учетом особенностей слоевого режима, включая структуру зернистой упаковки. Ключевым параметром такой контактной модели является сопротивление единичного контакта между зёрнами и образованный ими электропроводный каркас. По аналогии с плотным слоем проводимость «эмульсионной» фазы кипящего слоя можно представить, как результат некоторого среднего (дей-

ствующего) числа контактов, испытывающих незначительные динамические нагрузки.

Цели и задачи исследования

Основная проблема, возникающая при построении контактной модели проводимости (УЭС) слоя, – это выбор функциональной зависимости для сопротивления контакта. Согласно многочисленным исследованиям, при невысоких температурах (без ионизации газа) сопротивление контакта определяется диаметром частиц и внешней нагрузкой на слой. При этом в теории оно является алгебраической суммой сопротивления частицы, сопротивления области стягивания и переходного сопротивления.

На практике величина сопротивления контакта между двумя частицами в слое не поддается прямому измерению, однако может быть найдена косвенным путем по результатам определения УЭС слоя. На основе анализа регулярных упаковок [1; 13] несложно показать, что связь удельного электрического сопротивления слоя Ω с сопротивлением одного контакта может быть выражена простой зависимостью:

$$\Omega = k \cdot R_k \cdot d \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от плотности и координационного числа упаковки; R_k – усредненное сопротивление одного контакта, Ом; d – размер частиц.

В этой связи целью данной работы явилось изучение УЭС как функции параметров контакта: вида материала, размера частиц и внешней нагрузки.

Методика проведения исследования

Методика проведения исследования включала комплексный анализ известных в литературе опытных данных по сопротивлению слоя электропроводного материала на основе известных моделей проводимости в сочетании с лабораторными исследованиями УЭС углеродсодержащего материала.

Анализ математических моделей проводимости зернистых структур

При обработке экспериментальных значений УЭС слоя важным этапом исследования является выбор модели проводимости зернистой структуры. Данному вопросу посвящено большое количество публикаций. Исходя из характерных признаков подобия и различия, целесообразно остановится на некоторых из них:

– модель В. И. Лакомского на основе контактного пятна Хольма, полученная из анализа структуры с кубической упаковкой [1]:

$$\Omega = \Omega_0 \cdot \frac{d_u}{2 \cdot a'} \quad (2)$$

- модель Г. Н. Дульнева, основанная на представлении некоторого осредненного элемента слоя с заданными параметрами контакта [14]:

$$\Omega = \Omega_0 \cdot \left[\left(\frac{y_1}{y_4} \right)^{-2} \cdot \left(0,5 \cdot \overline{h_{uu}} + (1 - 0,5 \cdot \overline{h_{uu}}) \cdot \Phi \right) \right]; \quad (3)$$

- модель В. А. Ершова, К. Б. Козлова и Б. А. Лаврова, учитывающая сопротивление отдельных частиц [12; 15; 16]:

$$\Omega = \Omega_0 \cdot \left[M + \left(X + \frac{d}{Y + Z \cdot d^2} \right) \cdot \frac{1}{\sqrt{P}} \right] \quad (4)$$

- полуэмпирическая модель В. А. Кравченко и А. А. Серебренника, полученная с использованием теории контактных сопротивлений [12]:

$$\Omega = \Omega_0 \cdot \frac{C}{d^n \cdot P^m}, \quad (5)$$

где Ω - УЭС слоя, Ом·см; Ω_0 - УЭС материала, Ом·см; d - диаметр частицы, мм; a - радиус пятна контакта между частицами, мм; y_1 - относительный радиус фактического пятна контакта с учетом шероховатости поверхности; y_4 - относительный радиус осредненного элемента слоя; $\overline{h_{uu}}$ - шероховатость поверхности материала, мм; Φ - поправка на сопротивление растекания; P - давление в слое, МПа; $X, Y, Z, M, C, n = 0,1-0,8, m = 0,1-0,7$ - эмпирические коэффициенты моделей.

Анализ работ [1; 5; 12; 14; 15] показал, что их достоверность во многом определяют адаптивные эмпирические коэффициенты. Поэтому сложно однозначно утверждать, какая из зависимостей (2-5) является более универсальной. Например, подход [14] предполагает определение шероховатости поверхности частиц слоя, что является достаточно сложной задачей, особенно для частиц малого размера. С практической точки зрения заслуживает внимания модель В. А. Кравченко и А. А. Серебренника (5), которая в явном виде позволяет оценить влияние основных факторов, определяющих электропроводность слоя, и использовать ее при верификации более сложных моделей контактной проводимости.

Таким образом, обработка литературных данных по удельному электрическому сопротивлению плотного и кипящего слоя была проведена в виде степенной функции размера частиц и давления. Результаты такого анализа представлены в табл. 1. Как видно, модель (5) дает адекватные результаты, в том числе и для кипящих слоев при температуре до 1500 °С. Коэффициент корреляции r^2 регрессионных зависимостей довольно высокий и составляет 0,84-0,99. В то же время для отдельных исследований [4; 10] пока-

затель степени при диаметре частиц принимает значения большие единицы, что выходит за известные пределы $n = 0,1-0,8$ [12] и требует отдельного анализа.

Экспериментальное исследование УЭС порошка

Для проверки адекватности эмпирической модели проводимости (5) и получения зависимостей для электродного графита были дополнительно проведены лабораторные исследования удельного электрического сопротивления плотного слоя в холодном состоянии под давлением и без нагрузки.

Экспериментальная установка по исследованию УЭС под давлением (рис. 1) была выполнена в соответствии с ГОСТ 4668-75 [17] и представляла собой матрицу для испытуемого материала сечением 200 мм² с расстоянием между потенциальными зондами 8 мм. Источником питания постоянного тока являлся лабораторный стабилизатор ТЕС13. Падение напряжения между зондами определялось с помощью мультиметра DT9205A. Давление в слое создавалось дополнительной нагрузкой на верхний пуансон. Измерение УЭС слоя без нагрузки проводилось в отдельной матрице 19×12×h12 мм с двумя графитовыми электродами на торцах, расстояние между которыми составляло 19 мм (рис. 1б).

В качестве исследуемого материала использовались узкие фракции отсевов (<3 мм) механической обработки графитовых электродов.

Результаты исследований представлены на рис. 2-3 и в табл. 2. Как видно, аналогично другим дисперсным электропроводным материалам зависимость УЭС плотного слоя носит обратно пропорциональный характер. При этом степенной зависимости соответствует высокий коэффициент корреляции $r^2 = 0,87$, что согласуется с результатами других исследователей (табл. 1). Показатели степени при давлении и размере частиц попадают в известный диапазон [12].

Выводы

Процессы электротермического нагрева материала в плотном и кипящем слое могут быть описаны на основе контактной модели проводимости с учетом особенностей слоевого режима. Ключевыми элементами такой контактной модели являются сопротивление единичного контакта между зернами и образованный ими электропроводный каркас.

На основе комплексного анализа известных полуэмпирических моделей проводимости зернистых структур и опубликованных экспериментальных данных по сопротивлению плотного и кипящего слоя углеродных материалов показано, что степенная модель $\Omega = C \cdot P^m \cdot d^n$ хорошо описывает влияние давления и диаметра частиц для различных материалов.

Таблица 1

**Результаты обработки литературных экспериментальных данных
по исследованию электрического сопротивления слоя**

Материал, размер частиц	Режимы слоя	Вид зависимости Ω , Ом·см (R , Ом)	Авторы, литература
Электротехнический графит, $d_{\text{ч}} = 0,9-2,9$ мм (узкие фракции)	№ 1 - Предел устойчивости КС, $t_{\text{КС}} = 20$ °С	$\Omega = 114,7 \cdot d^{-0,49}$; $r^2 = 0,84$	В. А. Бородуля [4]
	№ 2 - КС, $t_{\text{КС}} = 20$ °С ($H / H_0 = 1,2$)	$\Omega = 288,8 \cdot d^{-0,47}$; $r^2 = 0,98$	
	№ 3 - Предел устойчивости КС, $t_{\text{КС}} = 1500$ °С	$\Omega = 32,0 \cdot d^{-0,46}$; $r^2 = 0,96$	
	№ 4 - КС, $t_{\text{КС}} = 1500$ °С ($H / H_0 = 1,2$)	$\Omega = 128,0 \cdot d^{-1,69}$; $r^2 = 0,86$	
Электродный графит, $d_{\text{ч}} = 0,07-1,2$ мм (узкие фракции)	Кипящий слой, $t_{\text{КС}} = 20$ °С	$\Omega = 20,5 \cdot d^{-0,21}$; $r^2 = 0,89$	А. П. Кожан [9]
Металлургический кокс, $d_{\text{ч}} = 3-70$ мм (узкие фракции)	Плотный непродуваемый слой:		В. Ю. Вархалев [8]
	№ 1 - $t = 20$ °С	$R = 2,5 \cdot d^{-0,55}$; $r^2 = 0,99$	
	№ 2 - $t = 200$ °С	$R = 0,7 \cdot d^{-0,46}$; $r^2 = 0,99$	
	№ 3 - $t = 750$ °С	$R = 0,3 \cdot d^{-0,40}$; $r^2 = 0,97$	
Сырой кокс, $d = 0-8$ мм (узкие фракции)	Плотный непродуваемый слой, $P = 0,027$ МПа:		Т. В. Чирка [10]
	№ 1 - $t = 20$ °С	$\Omega = 75,8 \cdot d^{-1,39}$; $r^2 = 0,98$	
	№ 2 - $t = 400$ °С	$\Omega = 36,0 \cdot d^{-1,08}$; $r^2 = 0,90$	
	№ 3 - $t = 900$ °С	$\Omega \approx 20$	
Сажа, $d = 50$ мкм	Плотный непродуваемый слой; $P = 0,05-0,75$ МПа	$\Omega = 0,3 \cdot P^{-0,61}$; $r^2 = 0,92$	J. Sanchez-Gonzalez [11]
Металлургический кокс, $d_{\text{ч}} = 3-70$ мм (узкие фракции)	Плотный непродуваемый слой; $P = 1,67-11,75 \cdot 10^{-3}$ МПа	$\Omega = \Omega_0 14,2 \cdot P^{-0,49} \cdot d^{-0,11}$; $r^2 = 0,99$	А. А. Белозеров [12]

Таблица 2

**Результаты обработки экспериментальных данных
по исследованию электрического сопротивления слоя**

Материал, размер частиц	Режимы слоя	Вид зависимости Ω , Ом·см
Отсевы боя графитовых электродов, $d_{\text{ч}} = 0,05-2$ мм (узкие фракции)	Плотный слой, $P = 11-50$ кПа	$\Omega = 0,848 \cdot P^{-0,08} \cdot d^{-0,46}$; $r^2 = 0,87$
	Плотный слой, $P = 0$ кПа	$\Omega = 39,8 \cdot d^{-0,54}$; $r^2 = 0,88$

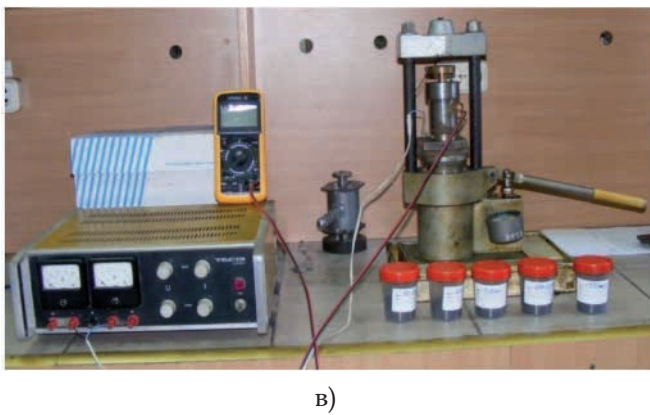
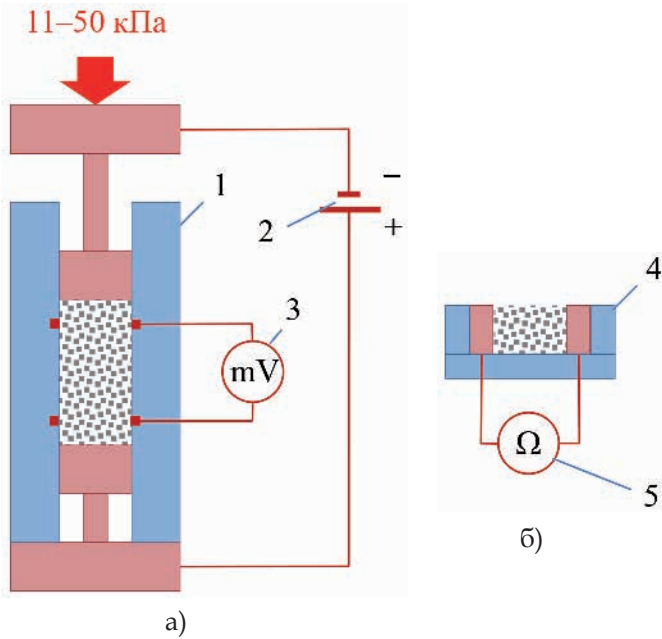


Рис. 1. Экспериментальная установка по измерению УЭС плотного слоя электропроводного материала:

а) – узел измерения УЭС под давлением; б) – узел измерения УЭС без механической нагрузки; в) общий вид экспериментальной установки; 1 – матрица порошкового материала под давлением по ГОСТ 4668-75; 2 – источник постоянного тока (лабораторный стабилизатор ТЕС-13); 3) милливольтметр (мультиметр DT9205A); 4) матрица порошкового материала без нагрузки 19×12×12 мм; 5) омметр (мультиметр DT9205A)

Экспериментально получены значения УЭС плотного слоя для порошка электродного графита под давлением в диапазоне 11–50 кПа и без нагрузки. По результатам обработки данных построены регрессионные модели, обеспечивающие расчет электропроводности с ошибкой не более 13 %.

Библиографический список

1. Лакомский В. И. Электрические и электроконтактные свойства электродного термоантрацита / В. И. Лакомский. – К.: АКАДЕМПЕРИОДИКА, 2008, – 102 с.

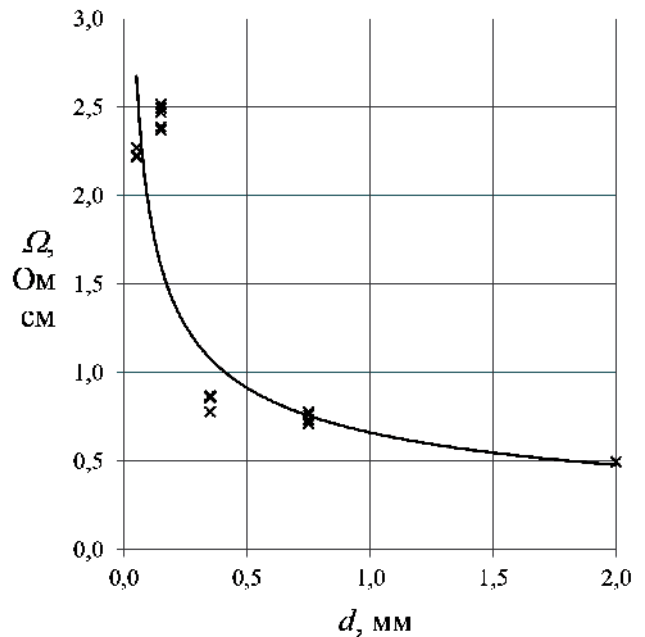


Рис. 2. Зависимость УЭС плотного слоя под давлением от размера углеродистых частиц ($P = 11-50$ кПа)

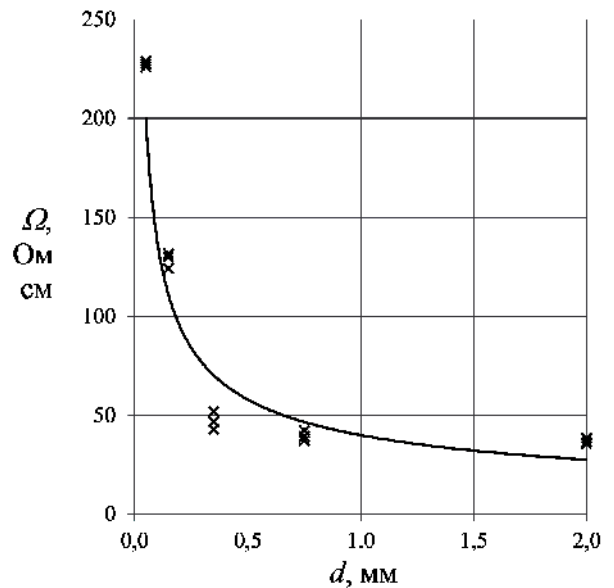


Рис. 3. Зависимость УЭС плотного слоя от размера углеродистых частиц

2. Цибуля Є. І. Удосконалення технологічних процесів отримання термоантрациту для електродів і футеровки феросплавних електропечей у трубчатих обертових печах та електрокальцинаторах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.16.02 «Металургія чорних металів» / Є. В. Цибуля. – Дніпропетровськ, 2012. – 20 с.

3. Гасик М. М. Моделирование термического и электрического режимов работы электрокальцинатора при термической обработке антрацита / М. М. Гасик, М. И. Гасик, О. Ю. Уразлина // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004. – № 5.

4. Бородуля В. А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое / В. А. Бородуля. – Минск: Наука и техника, 1973. – 173 с.
5. Modeling the Operation Regimes in Ultra-high Temperature Continuous Reactors: (Brookhaven National Laboratory. U.S. Department of Energy's Office of Science, USA) [Electronic resource] / S. S. Fedorov, Мю V. Gubynskiy, I. V. Barsukov. – Available at: <https://www.bnl.gov/isd/documents/86110.pdf>
6. Федоров С. С. Выбор размеров рабочего пространства электротермических печей кипящего слоя для переработки углеродных материалов / С. С. Федоров, М. В. Губинский, С. Н. Форись // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. – № 4. – С. 87–90.
7. Тодес О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы / О. М. Тодес, О. Б. Цитович. – Л.: Химия, 1981. – 296 с.
8. Вархалев В. Ю. Экспериментальная проверка математической модели определения электрического сопротивления насыпного материала, как нагревательного элемента в энергетических установках / В. Ю. Вархалев, О. В. Лунева, Ю. П. Вархалев [и др.] // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: електротехніка і енергетика*. Вип. 7 (128). – Донецьк, ДонНТУ, 2007. – С. 245–248.
9. Кожан А. П. Электросопротивление кипящего слоя графитовых частиц / А. П. Кожан, К. Е. Махорин, С. П. Гориславец // *ИФЖ*. – 1968. – Т. 15, № 4. – С. 648–652.
10. Чирка Т. В. Теплопровідність та електропровідність сипучих вуглецевих матеріалів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.14.06 «Технічна теплофізика та промисловатеплоенергетика» / Т. В. Чирка. – Київ, 2013. – 22 с.
11. Sa´nchez-Gonza´lez J. Electrical conductivity of carbon blacks under compression / J. Sa´nchez-Gonza´lez, A. Maci´as-Garci´a, M. F. Alexandre-Franco, V. Go´mez-Serrano // *Carbon*. – 2005. – Vol. 43. – P. 741–747.
12. Белозеров А. А. Зависимость удельной электрической проводимости гетерогенных систем от физических свойств составляющих фаз и давления: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.01 «Технология неорганических веществ» / Белозеров Алексей Андреевич. – Санкт-Петербург, 2010. – 163 с.
13. Двилис Э. С. Закономерности процессов консолидации порошковых систем при изменении условий деформации и физических воздействий: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 «Физика конденсированного состояния» / Двилис Эдгар Сергеевич. – Томск, 2014. – 386 с.
14. Дульнев Г. Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г. Н. Дульнев, В. В. Новиков. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
15. Ершов В. А. Разработка подходов к математическому моделированию электрических свойств углеродистой зоны РТП / В. А. Ершов, Б. А. Лавров, К. Б. Козлов [и др.] // Доклады научно-технического совещания «ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ-2000», «Компьютерное моделирование при оптимизации технологических процессов электротермических производств» (6–7 июня 2000 г., Санкт-Петербург). – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2000. – С. 15–26.
16. Козлов К. Б. Влияние давления на проводимость дисперсной электропроводящей системы / К. Б. Козлов, Б. А. Лавров, Д. А. Дронов // Труды Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ-2006», «Руднотермические печи» (6–8 июня 2006 г., Санкт-Петербург). – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2006. – С. 93–102.
17. Материалы углеродистые. Метод измерения удельного электрического сопротивления порошка: ГОСТ 4668-75. – М.: Госстандарт, 1975. – 16 с.

Поступила 29.09.2015

