

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ

УДК 62-503.56

© Жученко О.А.¹, Хібеба М.Г.²

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОКАЛЬЦИНАТОРОМ У ВИРОБНИЦТВІ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

Виконано порівняльний аналіз техніко-економічних показників як критеріїв оптимального керування електрокальцинатором. Визначено, що використання розглянутих показників має недоліки, пов'язані з особливостями виробництва. Запропоновано використання модифікованого показника питомої собівартості експлуатаційних витрат як такого, що дозволяє найбільш повно оцінити ефективність процесу термообробки вуглецевої сировини в електрокальцинаторі. Проведено постановку задачі керування електрокальцинатором у виробництві вуглецевих виробів.

Ключові слова: виробництво вуглецевих виробів, критерій оптимального керування, електрокальцинатор, електрична піч шахтного типу, вуглецева сировина, термообробка.

Жученко А.А., Хібеба М.Г. Постановка задачі управління електрокальцинатором в производстве углеродных изделий. Выполнен сравнительный анализ технико-экономических показателей как критериев оптимального управления электрокальцинатором. Определено, что использование рассмотренных показателей имеет недостатки, связанные с особенностями производства. Предложено использование модифицированного показателя удельной себестоимости эксплуатационных расходов как такового, что позволяет наиболее полно оценить эффективность процесса термообработки углеродного сырья в электрокальцинаторе. Проведено постановку задачі управління електрокальцинатором в производстве углеродных изделий.

Ключевые слова: производство углеродных изделий, критерий оптимального управления, электрокальцинатор, электрическая печь шахтного типа, углеродное сырье, термообработка.

O.A. Zhuchenko, M.G. Khibeba. Electric calciner control in the production of carbon products. A comparative analysis of technical and economic indicators as criteria for optimal electric calciner control has been done. It is shown that the use of the considered factors has some drawbacks resulting from the operating conditions. The modified factor of specific operating costs as the factor, that makes it possible to fully evaluate heat treatment of carbon materials in electric calciner efficiency has been proposed. The use of the electric calciner in the production of carbon products has been substantiated. Mathematically formulated control task setting includes selected optimality criterion and limitations. Optimality criterion based on the specific operating costs and takes into account costs that depend on technological mode and actual electric calciner performance. The specific operating costs includes material costs of raw materials, energy costs for carbon materials movement in electric calciner and for material heating by Joule heat. Actual electric calciner performance defined as the part of all processed material that has good quality. Limitations consist of material electrical resistivity at the outlet of the apparatus limitation, the temperature of heat treatment limitation, electric

¹ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, azhuch@ukr.net

² аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, hibebe19@gmail.com

power applied to the electrodes limitation and material heat treatment time in electric calciner limitation. Using these limitations when creating control system allows to keep product quality specified value and take into account device design features, carbon material and material heat treatment process in electric calciner features. Control task solving should provide optimally carbon materials heat treatment process functioning in terms of resource and energy saving mode and as a result, improve production of carbon products efficiency in general.

Keywords: *production of carbon products, electric calciner optimal control criterion, vertical electric oven, carbon materials, heat treatment.*

Постановка проблеми. У сучасній промисловості виробництво вуглецевих виробів є важливим процесом, оскільки продукція даного виробництва широко використовується в різноманітних галузях промисловості, які нерозривно пов'язані з необхідністю використання електротермічних процесів. Зокрема, до таких виробництв відносяться підприємства чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інші.

Виробництво вуглецевих виробів є досить ресурсо- та енергозатратним. Окрім того, існує необхідність суворого дотримання великої кількості технологічних параметрів. Саме тому актуальною є задача ведення технологічних процесів в оптимальних режимах на ключових етапах виробництва з метою зменшення затрат та забезпечення високої якості продукції.

Одним з визначальних технологічних процесів виробництва вуглецевої продукції є термічна обробка вуглецевої сировини в електричній печі шахтного типу (електрокальцинаторі), під час якої формуються властивості вуглецевої сировини, що впливають як на перебіг наступних технологічних процесів виробництва, так і, в решті решт, на якість готової продукції [1, 2]. Тому задача підвищення ефективності процесу термообробки в електрокальцинаторі є дуже актуальною і в сучасних умовах може бути розв'язана шляхом створення ефективної системи оптимального керування даним процесом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існуючі системи керування електрокальцинатором намагаються забезпечити максимальну електропровідність вуглецевого матеріалу при якомога менших значеннях витрати електроенергії та зносу апаратури. Даної мети пропонується досягти, керуючи тепловим режимом та режимом завантаження-розвантаження матеріалу по значенню змінних, що опосередковано визначають електроопір вуглецевого матеріалу на виході (покази амперметра, що характеризують загальний опір електрокальцинатора [2], спад напруги в зоні біля нижнього електроду [3], насипна густина матеріалу на виході [4]) або ж по експериментально визначеному значенню електроопору відібраної проби матеріалу [5].

Вищенаведені підходи до керування не забезпечують максимальної якості термообробки через неможливість точного визначення електропровідності матеріалу на виході в кожний момент часу [2-5] або ж пришвидшення зносу апаратури при практичній реалізації [4]. Тому жоден з цих підходів не можна вважати оптимальним.

Постановка задачі дослідження. Залежно від виду та рівня завдань оптимізації основні критерії оптимальності, що використовуються при цьому, можна розділити на економічні, техніко-економічні, технологічні, експлуатаційні та інші [6]. Найбільшого поширення при вирішенні задач оптимізації отримали економічні та техніко-економічні критерії оптимальності. Це пов'язано з тим, що в основі розробки будь-якого проекту або рішення лежать два принципи: технічний і економічний. Відповідно до першого принципу технологічний процес повинен гарантувати виконання всіх вимог на виготовлення виробів. Другий принцип визначає умови, що забезпечують мінімальні витрати праці і найменші витрати виробництва. Отже доцільно буде використовувати для синтезу оптимальної системи керування техніко-економічні критерії оптимальності, що забезпечать як виконання вимог на виготовлення виробів, так і забезпечать мінімізацію витрат.

У праці [7] сформульована загальна задача оптимізації виробництва вуглецевих виробів. У відповідності до поставленої задачі потрібно сформулювати задачі керування окремими технологічними процесами, що складають виробництво вуглецевих виробів у цілому. Одним з таких процесів є процес термообробки сировини в електрокальцинаторі.

Таким чином, **метою даної статті** є формулювання постановки задачі керування процесом термообробки вуглецевої сировини в електрокальцинаторі. Дана задача включає у себе фо-

рмулювання критерія оптимального керування та обмежень на технологічні параметри і керування процесу, а також на показники його якості.

Виклад основного матеріалу. *Аналіз техніко-економічних показників як критеріїв оптимального керування електрокальцинатором.* Розглянемо та проаналізуємо техніко-економічні показники, які можуть бути використані як критерії оптимального керування процесом термообробки вуглецевої сировини в електрокальцинаторі.

Найбільш загальним показником ефективності процесу є його рентабельність за нормативний час (тиждень, місяць, рік)

$$R_B = \frac{Q_B}{C_B}, \quad (1)$$

де Q_B – прибуток від реалізації продукції, C_B – собівартість продукції.

Прибуток від реалізації продукції розраховується таким чином

$$Q_B = \sum_{i=1}^N a_i F_i - \sum_{j=1}^M b_j S_j - Q_E, \quad (2)$$

де a_i, F_i – ціна одиниці та кількість одиниць i -го виду реалізованої продукції, відповідно;

b_j, S_j – відповідно, ціна одиниці та кількість одиниць j -го виду сировини, що використовувалась у виробництві;

N, M – кількість видів реалізованої продукції та сировини, відповідно;

Q_E – експлуатаційні витрати на виробництво.

Собівартість продукції складається із вартості експлуатаційних витрат і сировини

$$C_B = Q_E + \sum_{j=1}^M b_j S_j. \quad (3)$$

Щодо використання рентабельності як критерію оптимального керування процесом термообробки, слід зробити декілька зауважень. По-перше, зміна ціни на сировину та енергоносії ускладнює розрахунки за цим критерієм.

По-друге, процес термообробки сировини не є завершальним в процесі виробництва вуглецевих виробів. Тому для даного етапу фактично неможливо говорити про ціну готової продукції, яка підлягає реалізації.

Названі вище причини вказують на недоцільність використання рентабельності процесу термообробки вуглецевої сировини як критерію оптимального керування.

Прибуток від реалізації продукції та собівартість готової продукції можуть слугувати самостійними критеріями оптимального керування.

Прибуток від реалізації продукції згідно формули (2) містить у собі вартість експлуатаційних витрат, сировини та готової продукції.

Використання даного показника як критерію оптимального керування процесом термообробки вуглецевої сировини має ті ж вади, які згадувалися при аналізі критерію рентабельності.

Характерною особливістю *собівартості готової продукції* (3) як критерію оптимального керування є штучне зменшення складової, що визначається експлуатаційними показниками, тобто безпосередньо технологічними режимами виробництва. Це відбувається тоді, коли сировина стала або її зміна не пов'язана із зміною експлуатаційних показників і технологічних режимів виробництва. До недоліків використання даного показника можна віднести те, що він не враховує зміну продуктивності процесу, а отже мінімізація цього критерію може призвести до зменшення продуктивності.

Продуктивність процесу термообробки в електрокальцинаторі може вимірюватись кількісно (у штуках виробленої продукції)

$$K_{заг} = \sum_{i=1}^n k_i,$$

де k_i – кількість виробленого i -го виду продукції, штук;

або масово (кг, тон)

$$G_{зас} = \sum_{i=1}^n q_i,$$

де q_i – вага i -го виду продукції, кг.

При виборі одиниці вимірювання продуктивності процесу термообробки очевидно, що більш об'єктивним є оцінювання продуктивності масовим методом (кг, т).

Як самостійний критерій оптимального керування продуктивність зазвичай застосовують у таких випадках:

- якщо з метою оптимізації планують використовувати способи, за яких продуктивність процесу термообробки вуглецевої сировини зростає, а решта техніко-економічних показників (якість готового продукту, енерговитрати тощо) не погіршуються;

- якщо процес термообробки, що входить до складу технологічного комплексу виробництва вуглецевих виробів, є «вузьким місцем» і тому з метою підвищення ефективності роботи всього комплексу ставиться однозначна задача отримання максимальної продуктивності процесу незалежно від зміни інших її економічних показників або за їх обмежень.

Недоліком використання даного критерію є те, що він не враховує затрати на виробництво, а отже збільшення продуктивності може призвести до збільшення енерго- та ресурсовитрат.

В якості критеріїв оптимальності керування процесом термообробки вуглецевої сировини можуть використовуватись й *показники якості* проходження даного процесу. Якість проходження даного процесу визначається однорідністю властивостей матеріалу на виході з апарату при дотриманні їх деякого заданого значення. Найважливішою властивістю, що характеризує якість проходження процесу, є питомий електричний опір [1, 2, 8, 9].

Питома собівартість експлуатаційних витрат P_{np} визначається як

$$P_{np} = \frac{TC_{onm}}{G_{np}}, \quad (4)$$

де TC_{onm} – експлуатаційні витрати на процес термообробки, G_{np} – дійсна продуктивність електрокальцинатора. Використання даного показника в якості критерію оптимального керування у найбільшій мірі дозволяє оцінювати перебіг процесу термообробки вуглецевої продукції.

Постановка задачі керування. Проведений вище аналіз техніко-економічних показників, які можуть бути використані як критерії оптимального керування процесом термообробки вуглецевої сировини, показує, що у найбільшій мірі ефективність ведення даного технологічного процесу можна оцінити за допомогою критерію, що базується на питомій собівартості експлуатаційних витрат (4).

До загальних витрат на виробництво віднесемо ті, що тісно пов'язані з умовами проходження технологічного процесу, а саме енерго- та матеріальні витрати. Матеріальні витрати визначаються наступним чином:

$$C_m = P_m G_m, \quad (5)$$

де P_m , G_m – ціна та витрата сировини, відповідно.

Розглянемо фактори, які формують енерговитрати. До C_e віднесемо енерговитрати на переміщення вуглецевої сировини в електрокальцинатор та з нього, W_{II} та на нагрів матеріалу за рахунок виділення джоулевої теплоти, W_T :

$$C_e = P_e W_e = P_e (W_{II} + W_T), \quad (6)$$

де P_e – тариф на електроенергію; W_e – витрати електроенергії.

Тоді загальні витрати визначатимуться так:

$$TC_{onm} = P_e (W_{II} + W_T) + P_m G_m. \quad (7)$$

Отже, критерій оптимального керування, що впливає з (4), буде мати вигляд:

$$K_{onm} = \frac{(P_e (W_{II} + W_T) + P_m G_m)}{G_{np}}. \quad (8)$$

Математично загальна задача оптимального керування процесом термообробки вуглецевої сировини може бути сформульована наступним чином:

$$\begin{aligned} K_{opt} &\rightarrow \min \\ \Omega_n &\leq \Omega \leq \Omega_g, \end{aligned} \quad (9)$$

де Ω , Ω_n , Ω_g – вектор поточних значень технологічних змінних, вектор нижніх та верхніх припустимих значень цих змінних, відповідно.

Мінімізація критерію оптимальності можлива за рахунок як зменшення енерговитрат, так і збільшення дійсної продуктивності роботи електрокальцинатора.

Дійсна продуктивність електрокальцинатора визначається як

$$G_{np} = K_{np} G_{zag}, \quad (10)$$

де K_{np} – коефіцієнт, що характеризує частку продукції належної якості в усій масі обробленого матеріалу, G_{zag} – загальна продуктивність електрокальцинатора. Для збільшення G_{np} потрібно максимізувати K_{np} , тобто забезпечити такі умови, при яких весь термічно оброблений матеріал можна буде застосовувати в подальших стадіях виробництва вуглецевих виробів.

Продукцію вважають якісною у випадку, коли її питомий електричний опір не перевищує задане стандартом значення:

$$\rho \leq \rho_{cm}. \quad (11)$$

Забезпечення цієї умови можливе лише при рівномірному нагріві матеріалу до певної температури. Дослідження, проведені в промислових умовах, показали, що в процесі електронагріву спостерігається нерівномірний розподіл джерел теплоти як по висоті, так і по радіусу електрокальцинатора [10]. Це викликає перегрів центральної частини вуглецевої сировини, що знаходиться між електродами, що в свою чергу призводить до збільшення нерівномірності розподілу сили струму по радіусу, так як зі збільшенням температури питомий електроопір шару матеріалу знижується [11]. В результаті матеріал, що рухається на периферії біля футеровки електрокальцинатора, нагрівається по більшій мірі за рахунок теплообміну, його температура стає набагато нижчою за температуру центральних шарів і, як наслідок, якість продукції не задовольняє поставленим вимогам [8]. Саме тому необхідно підібрати такий режим обігріву, при якому для кожного шару сировини нагрів від джоулевої теплоти та теплообміну в сумі даватиме однакову швидкість нагріву. Також потрібно враховувати, що нагрів вуглецевої сировини до температур 2600-2800°C призводить до того, що велика кількість сировини графітується і вміст штучного графіту в вихідному продукті становить 40-60%. З одного боку, це забезпечує дуже низький питомий електричний опір матеріалу, але автори [12] вказують на те, що збільшення вмісту штучного графіту негативно впливає на пластичні властивості електродної маси. Це в свою чергу може призводити до збільшення кількості браку на наступних етапах виробництва, а, отже, виникає необхідність визначення оптимальної температури термообробки вуглецевої сировини, що забезпечить відповідність властивостей заданим значенням і при цьому не призведе до значного погіршення пластичних властивостей матеріалу.

Виходячи з вище написаного, потрібно ввести обмеження на температуру термообробки:

$$T_n \leq T \leq T_g, \quad (12)$$

де T , T_n , T_g – відповідно, дійсне значення температури термообробки, її нижнє та верхнє допустимі значення.

При керуванні даним процесом потрібно враховувати той факт, що значне збільшення активної потужності струму призводить до оплавлення вогнестійкої футеровки та утворення на її поверхні гарнісажу, що складається з піролітичного вуглецю зі спеченими шматками вуглецевої сировини. Наявність таких ділянок на поверхні футеровки призводить до необхідності зупинки агрегату та усунення оплавлених шматків [9].

Тому виникає обмеження на потужність струму, що підводиться до електродів, яке повинне враховувати як властивості джерела струму, так і той факт, що високе значення активної потужності струму призводить до оплавлення вогнестійкої футеровки і виходу з ладу апарату:

$$0 \leq P \leq P_g, \quad (13)$$

де P , P_g – відповідно, поточне значення потужності струму та її верхнє допустиме значення.

Ще одним обмеженням на керування є час, який вуглецева сировина перебуває в електрокальцинаторі. Він регулюється подачею матеріалу через живильник та обертанням розвантажувального стола і обмежується, з однієї сторони, часом, що потрібен для рівномірного нагріву до заданої температури, та мінімально допустимою продуктивністю апарату, з іншої сторони:

$$\tau_n \leq \tau \leq \tau_e, \quad (14)$$

де τ , τ_n , τ_e – відповідно, дійсне значення часу термообробки, його нижнє та верхнє допустиме значення.

Отже, об'єднуючи критерій оптимальності (8) та обмеження (11-14), математично постановка задачі керування електрокальцинатором у виробництві вуглецевих виробів виглядає таким чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{opt} = \frac{(P_e(W_{II} + W_T) + P_M G_M)}{G_{np}} \rightarrow \min \\ \rho \leq \rho_{cm} \\ T_n \leq T \leq T_e \\ 0 \leq P \leq P_e \\ \tau_n \leq \tau \leq \tau_e \end{array} \right. \quad (15)$$

Розв'язання даної задачі повинно забезпечити функціонування технологічного процесу термообробки вуглецевої сировини в оптимальному з точки зору ресурсо- та енергозбереження режимі та, як результат, підвищенню ефективності виробництва вуглецевих виробів в цілому.

Висновки

На основі проведеного аналізу техніко-економічних показників, які можуть бути використані у системі керування процесом термообробки вуглецевої сировини, обґрунтовано вибір критерію оптимального керування, що базується на питомій собівартості експлуатаційних витрат процесу.

Сформульовано задачу керування даним процесом з урахуванням обмежень, що накладаються на технологічні параметри та керування процесу для отримання потрібної продукції.

Для розв'язання поставленої задачі керування у подальших дослідженнях потрібно розробити математичну модель процесу термообробки вуглецевої сировини в електрокальцинаторі.

Перелік використаних джерел:

1. Чалых А.Ф. Графитация углеродистых материалов / А.Ф. Чалых, В.П. Соседов. – М. : Металлургия, 1987. – 176 с.
2. Производство электродной продукции / А.К. Санников [и др.]. – М. : Metallurgy, 1985. – 129 с.
3. Управление процессом прокаливания антрацита по измеряемой величине падения напряжения в антрацитовой загрузке электрокальцинатора / М.И. Гасик [и др.] // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2009. – № 5. – С. 31-35.
4. А. с. 1589020 СССР, МПК F 27 D 19/00, C 10 L 9/08, G 05 D 27/00. Способ управления процессом термopодготовки антрацита в электрокальцинаторе / В.Н. Николаев, В.Н. Гуляихин, А.А. Горбунов, А.Н. Фомниди. – № 4360527; заявл. 08.01.88; 30.08.90.
5. Пат. 97422 Україна, МПК F 27 B 3/08, F 27 D 11/00, C 10 L 9/08. Спосіб та електрокальцинатор для прожарювання сипучого вуглецевого матеріалу / В.Й. Лакомський, І.І. Токарев, Є.П. Крилов. – № а201006295; заявл. 25.05.10; опубл. 10.02.12, Бюл. № 3.
6. Бельков В.Н. Автоматизированное проектирование технических систем / В.Н. Бельков, В.Л. Ланшаков. – М. : Академия естествознания, 2009. – 144 с.
7. Zhuchenko O.A. Statement of the optimization problem of carbon products production / O.A. Zhuchenko // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів : Міжнар. наук.-вироб. журн. – 2016. – Vol. 8, Issue 2. – С. 39-44.
8. Анализ энергетической эффективности печей для высокотемпературной термической обработки углеродных материалов / М.В. Губинский [и др.] // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2013. – № 2. – С. 92-96.
9. Цыбуля Е.И. Анализ влияния физико-химических процессов на технологию производства

- термоантрацита в електрокальцинаторах / Е.И. Цыбуля, М.И. Гасик, А.Г. Гриншпунт // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 2. – С. 19-23.
10. Бородуля В.А. Высокотемпературные процессы в электротермическом кипящем слое / В.А. Бородуля. – Минск : Наука и техника, 1973. – 173 с.
 11. Петров Б.Ф. Энергосбережение при производстве электродного термоантрацита / Б.Ф. Петров. – К. : Екотехнология, 2006. – 144 с.
 12. Пат. 2121989 Россия, МПК С 04 В 35/52. Электродная масса для самообжигающихся электродов рудовосстановительных печей и способ ее получения / Ж.Л. Тимпанова, И.Р. Немировский, М.П. Арлиевский, А.М. Кисилев, Ю.Н. Сапов, А.С. Дерябин, М.И. Лифсон, С.З. Маргулис, В.А. Ровинский, Л.А. Богданов. – № 97102287/03; заявл. 18.02.97; опубл. 20.11.98.

References:

1. Chalyh A.F., Sosedov V.P. *Grafitacija uglerodistykh materialov* [Carbon materials Graphitization]. Moscow, Metallurgija Publ., 1987. 176 p. (Rus.)
2. Sannikov A.K., Somov A.B, Kliuchnikov V.V. *Proizvodstvo elektrodnoi produktsii* [Electrode products manufacturing]. Moscow, Metallurgija Publ., 1985. 129 p. (Rus.)
3. Gasik M.I., Tsybulia E.I., Bezuglyi A.V. Upravlenie protsessom prokalivaniia antratsita po izmeriaemoi velichine padeniia napriazheniia v antratsitovoi zagruzke elektrokalk'tsinatora [Control of anthracite calcination process by measured value of drop in voltage in anthracite loading of electrocalcinators]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, 2009, no.5, pp. 31-35. (Rus.)
4. Nikolaev V.N., Guliaikhin V.N, Gorbunov A.A., Fomnidi A.N. *Sposob upravleniia protsessom termpodgotovki antratsita v elektrokalk'tsinatore* [Anthracite heat treatment process in electric calciner control method]. Certificate of authorship USSR, no. 1589020, 1990. (Rus.)
5. Lakoms'kyj V.J., Tokarjev I.I., Krylov Je.P., *Sposib ta elektrokalk'cynator dlja prozharjuvannja sypuchogo vuglecevogo materialu* [Electric calciner and method for granular carbon material calcination]. Patent UA, no. 97422, 2012. (Ukr.)
6. Bel'kov V.N., Lanshakov V.L. *Avtomatizirovannoe proektirovanie tekhnicheskikh system* [Automated engineering systems design]. Moscow, Akademiia estestvoznaniia Publ., 2009. (Rus.)
7. Zhuchenko O.A. Statement of the optimization problem of carbon products production. *Avtomatyzacija tehnologichnykh i biznes-procesiv – Automation of technological and business processes*, 2016, no. 2, pp. 39-44. (Eng.)
8. Gubinskii M.V., Fedorov S.S., Livitan N.V., Gogotsi A.G. Analiz energeticheskoi effektivnosti pechei dlia vysokotemperaturnoi termicheskoi obrabotki uglerodnykh materialov [Kilns for carbon materials high-temperature heat treatment energy efficiency analysis]. *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, 2013, no. 2, pp. 92-96. (Rus.)
9. Tsybulia E.I., Gasik M.I., Grinshpunt A.G. Analiz vliianiia fiziko-khimicheskikh protsessov na tekhnologiiu proizvodstva termoantratsita v elektrokalk'tsinatorakh [Physicochemical processes effect on thermoanthracite production in electrocalcinators technology analysis] *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost' – Metallurgical and mining industry*, 2013, no. 2, pp. 19-23. (Rus.)
10. Borodulia V.A. *Vysokotemperaturnye protsessy v elektrotermicheskom kipiashchem sloe* [High-temperature processes in the electrochemical fluidized bed]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1973, 173 p. (Rus.)
11. Petrov B.F. *Energoberezhenie pri proizvodstve elektrodного termoantratsita* [Energy saving in the electrode thermoanthracite production]. Kiev, Ekotekhnologija Publ., 2006, 144 p. (Rus.)
12. Timpanova Zh.L., Nemirovskii I.R., Arlievskii M.P., Kisilev A.M., Sapov Iu.N., Deriabin A.S., Lifson M.I., Margulis S.Z., Rovinskii V.A., Bogdanov L.A. *Elektrodnaia massa dlia samoobzhigaiushchikhsia elektrodov rudovosstanovitel'nykh pechei i sposob ee polucheniia* [Electrode mass for ore reduction furnaces self-baking electrodes and the method for obtaining it]. Patent RU, no. 2121989, 1998. (Rus.)

Рецензент: Є.М. Панов

д-р техн. наук, проф., КПІ ім. Сікорського

Стаття надійшла 22.04.2017