

УДК 681.3:669.02.09

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО РАФИНИРОВАНИЯ МЕДИ С ПОМОЩЬЮ СППР

Гронь Д.Н., Любанова А.Ш., Ченцов С.В.

ГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, e-mail: gdn84@mail.ru

Рассматривается проблема создания системы поддержки принятия решений для повышения эффективности управления процессом электролитического рафинирования меди. Разработаны математическая модель и алгоритм управления. Математическая модель управления процессом электролитического рафинирования меди включает в себя статистическую модель технологического процесса и математическую модель принятия решений. Модель процесса состоит из двух регрессионных зависимостей для выхода по току и производительности электролизера, уравнения для плотности тока и технологические ограничения. Управление технологическим процессом осуществляется в режиме настройки выходных параметров. В устройстве управления сравниваются фактические значения выхода по току и производительности электролизера с желаемыми. На основе алгоритма управления построена система поддержки принятия решений, с помощью которой решается задача автоматизации управления процессом электролитического рафинирования меди.

Ключевые слова: система поддержки принятия решений, электролиз меди, автоматизация управления процессом электролиза, задача управления

IMPROVED MANAGEMENT OF THE PROCESS OF ELECTROLYTIC REFINING OF COPPER WITH THE HELP OF DECISION SUPPORT SYSTEMS

Gron D.N., Lyubanova A.S., Chenscov S.V.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: gdn84@mail.ru

The paper discusses the problem of the development of an expert support system for more effective control over the electrolytic refining copper. A mathematical model and control algorithm are designed. The mathematical model of the control of the electrolytic refining copper involves the statistical model of the technological process and the mathematical model of the decision making. The model of the process consists of the regression equations for the current yield and the cell efficiency and the equation for the current density. The process control is effected within the mode of tuning the output parameters. The actual values of the current yield and the cell efficiency are compared with the desired ones by the control device. The expert support system of the refining process is created on the basis of the control algorithm, which allows solving the problem of the control process automation for the electrolytic refining copper.

Keywords: expert support system, copper electrolysis, automation of electrolysis control, control problem

Управление сложными объектами, как правило, осуществляется в условиях недостатка и неточности информации, что может привести к принятию ошибочных решений и серьёзным ошибкам в управлении. В такой ситуации наиболее рациональным является применение современных информационных технологий для автоматизированного управления сложными процессами с помощью системы поддержки принятия решений (СППР). СППР необходимо использовать, когда процесс принятия решений ввиду необходимости учета субъективного мнения не может быть полностью формализован и реализован на ЭВМ. Такая система выступает в роли помощника, который позволяет расширить возможности человека, но не заменяет его мнение или систему предпочтений. Таким образом, СППР можно определить как человеко-машинную информационную систему, используемую для поддержки действий в ситуациях, когда невозможно создать автоматическую систему представления и реализации всего процесса оценки и выбора альтернатив.

Большинство СППР работает с числовыми данными, аналитическими моделями и решает проблемы, которые предварительно описываются на языке таких моделей. Однако СППР могут выполнять и некоторые интеллектуальные функции, если в их структуру включить базу знаний и использовать механизм логического вывода. В этом случае СППР становится способной работать в условиях неполноты исходной информации, использовать вероятностные выводы, вырабатывать суждения и объяснения, которые выдаются в качестве рекомендаций при принятии решений, реализуемых на базе СППР.

Одним из наиболее сложных технологических процессов является процесс производства цветных металлов, в частности, меди. Помимо высокого уровня сложности металлургические процессы характеризуются неопределённостью изменения параметров и трудностью получения данных. Существующие в настоящее время логические и математические модели не позволяют корректно управлять таким процессом с помощью АСУ.

Процесс электролитического рафинирования относится к гидрометаллургическим процессам. Существующие в настоящее время СППР используются преимущественно для пирометаллургических процессов, например, в алюминиевой промышленности. В частности, СППР «Стабилизация состава электролита на базе математической модели» [5] рассчитывает для каждого электролизера добавки сырья AlF_3 для корректировки криолитового отношения электролита как важнейшего параметра его химического состава.

Что касается автоматизации гидрометаллургических процессов, в [2] была разработана математическая модель процесса электролитического рафинирования меди и структура информационно-управляющей системы, на основе которой создан компьютерный тренажёр. В качестве исходных данных для построения моделей используются экспериментальные зависимости выходных показателей от входных и управляющих воздействий [4]. По полученным массивам экспериментальных данных строились полиномиальные регрессионные уравнения. С помощью компьютерного тренажёра была также исследована проблема повышения технико-экономических показателей процесса электролиза.

Данная работа является продолжением исследования, начатого в [2]. Основной целью данной работы является разработка алгоритма управления процессом электролитического рафинирования меди и построение СППР как основной части информационно управляющей системы на базе математической модели данного процесса.

Математическая модель процесса и постановка задачи управления

Процесс электролитического рафинирования ведут в электролизерах, которые называют ваннами. Ванны изготавливают монолитные из железобетона, собирая их в блоки по 10–20 ванн, а затем в серии, состоящие, как правило, из двух блоков. Учитывая агрессивность электролита, содержащего серную кислоту высокой концентрации, внутреннюю часть ванн футеруют. Внутренние размеры ванны не стандартизованы. Примерные размеры ванн: длина от 3,5 до 5,5 м, ширина от 1 до 1,1 м и глубина 1,2–1,3 м. Размеры электродов на разных заводах различны. С введением механизации разгрузочных работ стали применять аноды больших размеров – 860×860 мм. Масса анодов на некоторых заводах достигает 350 кг, а их количество – в среднем 43 штуки. Толщина анодов равна 35–45 мм.

Входными параметрами данного процесса являются плотность тока (D , А/м²); содержание серной кислоты в электролите ($C_{H_2S_4O}^{эл}$, г/л); содержание сульфата меди в электролите ($C_{CuSO_4}^{эл}$, г/т); содержание меди в электролите ($C_{Cu}^{эл}$, г/л); скорость подачи электролита (V , л/мин), а выходными – выход по току и производительность.

Для осуществления управления необходимо иметь специальные инструментальные средства, позволяющие формировать управляющее воздействие. В качестве такого средства предложен виртуальный объект управления – компьютерный тренажёр, разработанный на основе математической модели процесса электролитического рафинирования меди [2]:

$$\eta_{Cu} = 885,52052 + 0,01869 \cdot V + 0,01048 \cdot D^2 - 5,79232 \cdot D + 1,43 \cdot 10^{-4} \cdot (C_{H_2S_4O}^{эл})^2 - 0,01231 \cdot C_{H_2S_4O}^{эл} + 0,09 \cdot 10^{-5} \cdot (C_{Cu}^{эл})^2 - 4,98 \cdot 10^{-3} \cdot C_{Cu}^{эл} + 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot (C_{CuSO_4}^{эл})^2 - 0,07688 \cdot C_{CuSO_4}^{эл}; \quad (1)$$

$$Pr_{Cu} = -122,6664 + 0,0145 \cdot V - 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot D^2 + 1,30096 \cdot D + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot (C_{H_2S_4O}^{эл})^2 - 0,09653 \cdot C_{H_2S_4O}^{эл} + 4,4 \cdot 10^{-5} \cdot (C_{Cu}^{эл})^2 - 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot C_{Cu}^{эл} + 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot (C_{CuSO_4}^{эл})^2 - 0,0436 \cdot C_{CuSO_4}^{эл}; \quad (2)$$

$$D = IS_{ан}^{-1}, \quad (3) \quad \text{электролизёра } Pr, \text{ тонн/сутки; } I - \text{ сила тока, кА; } S_{ан} - \text{ площадь анодов, м}^2.$$

где η_{Cu} – оценка математического ожидания выхода по току η , %; Pr_{Cu} – оценка математического ожидания производительности

Модели построены по данным основной технологической выборки, для которой было произведено 67 измерений на одном

лабораторном агрегате за полный технологический цикл. Измерения производились на ЦЭМ-1 и ЦЭМ-3 электролизного цеха НГМК и КУЭМ. Средняя плотность тока по ЦЭМ-1 275 А/м² и по ЦЭМ-3 310 А/м². А диапазон изменений выхода по току составлял 84–92%.

Проверка моделей (1) и (2) показывает, что корреляционное отношение между экспериментальными и расчётными значениями для выхода по току $R = 0,989$, а для производительности – $R = 0,987$. Средняя относительная невязка для выхода по току и производительности не превышает 2%. Оценка общего качества регрессии по критерию Фишера при уровне значимости, равном $\alpha = 0,05$, и объеме выборки $n = 100$ показала, что гипотеза о независимости выхода по току и производительности от параметров, указанных в уравнениях (1) и (2), отклоняется. В данном случае для модели выхода по току выборочное значение статистики $F = 454,324$ больше, чем $F_{кр} = 1,394$, аналогично для производительности $F = 305,513 > F_{кр}$. Все коэффициенты в моделях (1) и (2) статистически значимы. О законе распределения ошибок можно судить по выборочному значению статистики χ^2_v . При уровне значимости $\alpha = 0,05$ для выхода по току $\chi^2_v = 3,881$, а для производительности $\chi^2_v = 13,991$. Поскольку критическое значение $\chi^2_{кр} = 14,067$, для обоих уравнений выполняется $\chi^2_v < \chi^2_{кр}$. Следовательно, гипотеза о нормальном законе распределения ошибок модели принимается.

Адекватность построенных моделей подтверждена также проверкой статистической гипотезы о равенстве коэффициентов регрессионных моделей, построенных по основной и контрольной выборкам.

Управление технологическими процессами, как правило, осуществляется по схеме регулирования в режиме настройки. В устройстве управления сравнивается желаемое и действительное значения выходных параметров. Это позволяет определить, насколько состояние объекта отличается от требуемого (задаваемого программой). Управление строится на основе системы функций невязки

$$I(\eta, \text{Pr}) = f_1(\eta_3 - \eta; \text{Pr}_3 - \text{Pr}); \quad (4)$$

$$V(\eta, \text{Pr}) = f_2(\eta_3 - \eta; \text{Pr}_3 - \text{Pr}), \quad (5)$$

с помощью которой рассчитываются управляющие воздействия, а именно сила тока I и скорость циркуляции электролита V в зависимости от отклонения текущего зна-

чения каждого из выходных параметров от заданного. Здесь индексом «з» обозначается заданное (предпочтительное) значение контролируемого параметра. Задача управления в этом случае формулируется так: при заданных значениях параметров: $C_{\text{H}_2\text{S}_4\text{O}}^{\text{эл}}$, $C_{\text{Cu}}^{\text{эл}}$, $C_{\text{CuSO}_4}^{\text{эл}}$ найти значения I и V , удовлетворяющие ограничениям

$$24 \leq I \leq 25, \quad (6)$$

$$12 \leq V \leq 30, \quad (7)$$

при которых $\eta_3 - \eta \rightarrow \min$, $\text{Pr}_3 - \text{Pr} \rightarrow \min$. На практике обычно последние требования заменяются условиями

$$\eta_3 - \eta \leq \varepsilon_1, \quad \text{Pr}_3 - \text{Pr} \leq \varepsilon_2, \quad (8)$$

где ε_1 и ε_2 – некоторые достаточно малые величины, $\varepsilon_1 \geq 0$, $\varepsilon_2 \geq 0$, и задача управления формулируется так: при ограничениях (6)–(7) и заданных значениях $C_{\text{H}_2\text{S}_4\text{O}}^{\text{эл}}$, $C_{\text{Cu}}^{\text{эл}}$, $C_{\text{CuSO}_4}^{\text{эл}}$ требуется с помощью соответствующих управляющих воздействий I и V добиться того, чтобы значения целевых функционалов, т.е. выходных параметров η и Pr , в любой момент времени находились в достаточно малой окрестности η_3 и Pr_3 .

Процесс электролитического рафинирования относится к стохастическим процессам. Кроме того, используемая математическая модель (1)–(3) является статистической. Поэтому при реализации управления процессом электролиза в режиме настройки необходимо учитывать, что условия (8) должны выполняться в смысле математического ожидания:

$$M[\eta_3 - \eta] \leq \varepsilon_1, \quad M[\text{Pr}_3 - \text{Pr}] \leq \varepsilon_2.$$

Очевидно, что, имея пусть и оптимальные статистические оценки математических ожиданий, нельзя точно проверить выполнение данных условий. Однако для любого фиксированного набора значений входных и управляющих воздействий можно испытать статистические гипотезы относительно неизвестного условного среднего.

$$H_0 : M[\eta_3 - \eta] \leq \varepsilon_{13} \text{ и } M[\text{Pr}_3 - \text{Pr}] \leq \varepsilon ;$$

$$H_1 : M[\eta_3 - \eta] > \varepsilon_{13} \text{ и } M[\text{Pr}_3 - \text{Pr}] > \varepsilon .$$

Принятие гипотезы H_0 даёт достаточно оснований объявить значения управляющих параметров I и V допустимыми, а принятие гипотезы H_1 – недопустимыми.

При любом критерии проверки гипотезы возможны ошибки, когда недопустимые значения I и V объявляются допустимыми, либо допустимые значения объявляются недопустимыми. Устранить указанные

ошибки, связанные с неточностью статистической модели, невозможно, однако их можно минимизировать выбором подходящего критерия проверки гипотезы H_0 .

Поскольку в соответствии с принципом недостаточного обоснования оценки коэффициентов моделей (1)–(2) и соответственно условных средних $M[\eta]$ и $M[\text{Пр}]$ распределены апостериори по нормальному закону, оптимальным для данного закона распределения является критерий максимального правдоподобия [1]. Согласно

данному критерию, суммарная вероятность ошибочного решения будет минимальной, если статистические оценки условных математических ожиданий (1) и (2) удовлетворяют неравенствам (8) независимо от значений условных дисперсий. Регулирование значений управляющих воздействий требуется только тогда, когда нарушается хотя бы одно из условий

$$\eta_{\text{Cu}} \geq \eta_3 - \varepsilon_1, \text{Пр}_{\text{Cu}} \geq \text{Пр}_3 - \varepsilon_2. \quad (9)$$

Введём обозначения:

$$d_{\text{Cu}} = 885,52052 + 1,43 \cdot 10^{-4} \cdot (C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{эл}})^2 - 0,01231 \cdot C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{эл}} + 0,09 \cdot 10^{-5} \cdot (C_{\text{Cu}}^{\text{эл}})^2 - 4,98 \cdot 10^{-3} \cdot C_{\text{Cu}}^{\text{эл}} + 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot (C_{\text{CuSO}_4}^{\text{эл}})^2 - 0,07688 \cdot C_{\text{CuSO}_4}^{\text{эл}}; \quad d_{11} = 0,01048; \quad d_{12} = -5,79232; \quad d_{13} = 0,01869.$$

С учетом этих обозначений уравнение (1) примет вид:

$$\eta_{\text{Cu}} = d_{\text{Cu}} + d_{11}D^2 + d_{12} \cdot D + d_{14} \cdot V. \quad (10)$$

Аналогично запишем уравнение (2):

$$\text{Пр}_{\text{Cu}} = d_{\text{пр}} + d_{21} \cdot D^2 + d_{22} \cdot D + d_{23} \cdot V, \quad (11)$$

где

$$d_{\text{пр}} = -122,6664 + 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot (C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{эл}})^2 - 0,09653 \cdot C_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{\text{эл}} + 4,4 \cdot 10^{-5} \cdot (C_{\text{Cu}}^{\text{эл}})^2 - 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot C_{\text{Cu}}^{\text{эл}} + 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot (C_{\text{CuSO}_4}^{\text{эл}})^2 - 0,0436 \cdot C_{\text{CuSO}_4}^{\text{эл}}; \quad d_{21} = -2,4 \cdot 10^{-3}; \quad d_{22} = 1,30096 \quad d_{23} = 0,0145.$$

Управляющие воздействия достаточно выбрать такими, при которых неравенства (9) обращаются в равенства, т.е. являются решением системы уравнений

$$d_{\text{Cu}} + d_{11}D^2 + d_{12}D + d_{13}V = \eta_3 - \varepsilon_1;$$

$$d_{\text{пр}} + d_{21} \cdot D^2 + d_{22} \cdot D + d_{23} \cdot V = \text{Пр}_3 - \varepsilon_2.$$

Решая данную систему уравнений, с учётом (3) получаем формулы для расчёта I и V :

$$I = \frac{\left(-d_{12}d_{23} + d_{22}d_{13} + \left((d_{12}d_{23} - d_{22}d_{13})^2 - 4(d_{11}d_{23} - d_{21}d_{13})(d_{13}b_2 - d_{23}b_1)\right)^{1/2}\right)}{2(d_{11}d_{23} - d_{21}d_{13})} S_{\text{ан}}, \quad (12)$$

$$V = \frac{b_2 S_{\text{ан}}^2 - d_{21} \cdot I^2 - d_{22} I \cdot S_{\text{ан}}}{d_{23} S_{\text{ан}}}. \quad (13)$$

Здесь

$$b_1 = \eta_3 - \varepsilon_1 - d_{\text{Cu}} \quad \text{и} \quad b_2 = \text{Пр}_3 - \varepsilon_2 - d_{\text{пр}}.$$

Таким образом, использование соотношений (12)–(13) позволяет выбрать режим, в наибольшей степени отвечающий поставленным требованиям.

Математическая модель принятия решения

Моделирование процессов принятия решения включает в себя формирование исходного множества альтернатив и построение функции выбора. Альтернативами в данном случае являются все возможные состояния S системы, которые определяются наблюдаемыми и управляющими параметрами процесса (рисунок). Эти параметры будем называть атрибутами состояния.

Согласно постановке задачи управления выбор наилучшей альтернативы при заданных наблюдаемых параметрах эквивалентен выбору значений управляющих воздействий I и V , при которых выполняются условия (9) для выходных параметров. Поэтому атрибуты I и V являются критериями альтернативы. Таким образом, исходное множество альтернатив Ω состоит из всех возможных пар (I, V) удовлетворяющих ограничениям (6), (7). Каждую пару снова будем обозначать буквой S .

Для построения функции выбора определим на исходном множестве альтернатив Ω булеву функцию $f(S)$, значение которой на альтернативе S равно 1, если предикат $P(S) = (\eta_{\text{Cu}} \geq \eta_3 - \varepsilon_1) \wedge (\text{Пр}_{\text{Cu}} \geq \text{Пр}_3 - \varepsilon_2)$ принимает значение «истинно». Если значение $P(S)$ – «ложно», то $f(S) = 0$. Зададим на исходном множестве альтернатив бинарное отношение R_f по следующему прави-

лу: для любых $S_1, S_2 \in \Omega$ выполняется $S_1 R S_2 \Leftrightarrow f(S_1) > f(S_2)$. Отношение R_f порождает нормальную функцию выбора C^R такую, что для любого $X \subseteq \Omega$

$$C^R(X) = \{S^* \mid \forall S \in X \quad f(S) \leq f(S^*)\}. \quad (14)$$

Она эквивалентна функции выбора

$$C(X) = \{S \in X \mid f(S) = 1\}. \quad (15)$$

В данном случае множество недоминируемых альтернатив состоит из всех пар $(I, V) \in C(\Omega)$.



Формирование исходного множества альтернатив

Таким образом, математическая модель управления процессом электролитического рафинирования меди включает в себя модель технологического процесса (1)–(3), технологические ограничения (6), (7), (13) и математическую модель принятия решения, состоящую из исходного множества альтернатив Ω и функции выбора (15). Условие $f(S) = 1$ обеспечивается формулами для расчёта управляющих воздействий (12), (13).

Алгоритм функционирования СППР

Построенная математическая модель управления технологическим процессом позволяет разработать алгоритм функционирования СППР. Обработка информации в СППР осуществляется как оператором-технологом, так и с помощью математической модели управления технологическим процессом электролитического рафинирования меди. Для разграничения функций модели и человека необходимо составить алгоритм обработки информации в СППР, который будет определять место математической модели и действий оператора в системе управления.

Схема функционирования СППР включает в себя следующие этапы.

1. Оператор вводит исходные данные: состав анодного сырья, состав электролита (содержание меди в электролите и анодах, содержание серной кислоты и сульфатов меди в электролите, сила тока и скорость циркуляции электролита).

2. Оператор указывает, нужно ли учитывать случайные возмущения. Если нужно, то осуществляется переход к блоку 3, в противном случае – к блоку 4.

3. Оператор вводит случайные воздействия.

4. Система осуществляет опрос одного из датчиков входных параметров (сила тока, скорость циркуляции электролита, состав анодного сырья и электролита).

5. Система проверяет условия управления. Если $P(S) = \text{«истинно»}$, то осуществляется переход к блоку 11.

6. Система производит расчёт I и V по формулам (12)–(13).

7. СППР выводит рекомендации по управлению в случае, когда текущие значения выходных параметров не соответствуют эталонным.

8. Оператор вводит рекомендованные значения I и V в систему.

9. Система производит расчет прогнозируемого выхода по току и производительности по математическим моделям (1)–(3).

10. Система проверяет, соответствуют ли выходные показатели эталонному значению (решается задача принятия решения). В случае «да» осуществляется переход к блоку 11, а в случае «нет» – к блоку 6.

11. Система выводит на экран прогнозируемые выходные показатели: выход по току и производительность.

12. Система проверяет, произведён ли опрос всех датчиков. Если «нет» осуществляется опрос следующего датчика – переход к блоку 4, если «да» – к блоку 13.

13. Система выводит отчёты об итогах работы СППР.

На основе данного алгоритма функционирования разработана СППР, реализующая как режим управления реальным объектом, так и режим компьютерного тренажера (экспертной системы) [3].

Система работает следующим образом. Значения управляющих параметров выбираются, исходя из имеющегося опыта, или рассчитываются по формулам (12) и (13) для идеальных условий функционирования процесса.

Эффективность выбранного значения управляющего воздействия проверяется с помощью компьютерного тренажера путем введения рассчитанного управления. Если реакция СППР по управляющим воздействиям устраивает оператора, то выбранное управление применяется к реальному объекту управления. В противном случае выбор управления необходимо продолжить.

Численный эксперимент проводился при данных, полученных на промышленном электролизёре, где было установлено 43 анода, и их суммарная площадь составляет 30 м². Показатели сняты при следующих входных и управляющих параметрах: $C_{H_2S_4O}^{эл} = 100$ г/л., $C_{Cu}^{эл} = 80$ г/л., $C_{CuSO_4}^{эл} = 198$ г/л., $D = 272$ А/м² и $V = 19$ л/мин.

Средний показатель выхода по току повышается с 87,46, что соответствует среднему выходу тока на реальном агрегате, до 88,99% и производительности – с 0,0498 до 0,0506 т/сут за один технологический цикл. С учётом границ доверительного интервала для невязки модели выхода по току [0,24, 0,34] с вероятностью 0,95 можно утверждать, что абсолютная погрешность вычисления выхода по току не превышает 0,34%. Поэтому достигнутый экономический эффект для выхода по току составляет не менее 1,19% с той же доверительной вероятностью. Аналогично экономический эффект производительности составляет 0,0006 т/сут.

Заключение

В данной статье разработаны математическая модель и алгоритм управления процессом электролитического рафинирования меди. На основе этого алгоритма создана СППР. Использование СППР приводит к стабилизации качества управления, так как уменьшается диапазон колебания выхода по току и производительности, позволяет решить задачу автоматизации процессом электролитического рафинирования и увеличить показатель выхода по току и производительность, т.е. улучшить качество управления электролизом.

Список литературы

1. Вошинин А.П., Сотиров Г.Р. Оптимизация в условиях неопределённости – М.: Изд-во ЭИИ, «Техника» (НРБ), 1989. – 224 с.
2. Гронь Д.Н., Горенский Б.М. Информационно-управляющая система процессом электролитического рафинирования меди // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». – 2009. – Т. 4. – № 3. – С. 301–310.
3. Гронь Д.Н., Горенский Б.М., Озерова Е.Л. Система поддержки принятия решений «Электролитическое рафинирование меди» // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ Роспатент № 2011610263, 11.01.2011.
4. Зотков О.М. Электроосаждение меди: технико-экономический аспект. Ч.1. Теория и практика электроосаждения меди / О.М. Зотков. – Красноярск: Изд-во. Красноярского ун-та, 1992. – 200 с.
5. Пискажова Т.В. Методы эффективного управления технологическим процессом электролитического получения алюминия // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологий. – 2010. – Т. 3. – № 2. – С. 159–170.

References

1. Voshchinin A.P., Sotirov G.R. *Optimizatsiya v usloviakh neopredelyonnosti* [Optimization under uncertainty]. Moscow, Moscow, «Tehnika» (NRB), 1989. 224 p.
2. Gron D.N., Gorenskiy B.M. *Zhurnal Sibirskogo federalnogo universiteta. Seriya «Tehnika i tehnologii»*, 2009. T. 4. no. 3. pp. 301–310.
3. Gron D.N., Gorenskii B.M., Ozerova E.L. *Sistema podderzhki priniatiya resheniy «Elektroliticheskoe rafinirovanie medi». Svidetelstvo o registratsii programmi dlya EVM* [Expert support system «The electrolytic copper refining». Registration certificate of software]. Rospatent. № 2011610263, 11.01.2011.
4. Zotkov O.M. *Elektroosazhdenie medi: tekhniko-ekonomicheskii aspekt. Chast.1. Teoriya i praktika elektroosazhdeniya medi* [Copper electrowinning: technical and economic aspect. Part 1. Theory and practice of copper electrowinning]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk University Publ., 1992. 200 p.
5. Piskazhova T.V. *Zhurnal Sibirskogo Federalnogo Universiteta*, 2010. T. 3. no 2. pp. 159–170.

Рецензенты:

Ловчиков А.Н., д.т.н., профессор, Сибирский аэрокосмический университет, г. Красноярск;

Ступина А.А., д.т.н., зав. кафедрой информационных технологий менеджмента Института управления бизнес-процессов и экономики Сибирского федерального университета, г. Красноярск.

Работа поступила в редакцию 11.07.2013.