ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(11-1):366–373
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.7:681.5 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_366

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АГИТАТОРА ДЛЯ СЕРНОКИСЛОТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЦИНКА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Р. Е. Леонов[1], С. С. Патраков[1]

[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация: Статья посвящена разработке математической модели одного из основных заключительных процессов получения металлического цинка из огарков рудного сырья. Для создания модели потребовалось обратиться к теоретическому описанию кинетики процесса выщелачивания и возможности аппроксимации его математического описания типовым звеном автоматического управления. Без этого невозможно проектирование и настройка систем автоматического регулирования процесса выщелачивания. В основе разработки математической модели лежит предположение, что извлечение металлического цинка в процессе выщелачивания опирается на кинетическое уравнение реакции взаимодействия оксида цинка с серной кислотой. В первом приближении приняты описание кинетики уравнением первого порядка и уравнением материального баланса в агитаторе. Это позволило получить дифференциальное уравнение процесса, переходную кривую и аппроксимировать ее с высокой точностью уравнением инерционного звена автоматического управления. На основе теоретического описания технологического процесса получено уравнение извлечения цинка в процессе выщелачивания. Интегрирование уравнения изменения концентрации позволило аппроксимировать математическую модель выщелачивания с достаточной точностью инерционным звеном первого порядка, что в дальнейшем является базой для разработки системы автоматического управления процессом выщелачивания.

Ключевые слова: объект управления, выщелачивание, приближенная кинетика процесса, точность аппроксимации инерционным звеном.

Для цитирования: *Леонов Р. Е.*, *Патраков С. С.* Математическая модель агитатора для сернокислотного выщелачивания цинка как объекта управления // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 11-1. — С. 366–373. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_366.

Mathematical model of agitator for sulfuric-acid zinc leaching as a control object

R. E. Leonov[1], S. S. Patrakov[1]

[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Abstract: This study focuses on mathematical modeling of one of the main finishing processes in production of metal zinc from roasted products. With this end in view, the theory of leaching kinetics was addressed with a view to approximating the mathematical description by a standard autocontrol link. This is required for the design and setting of systems for automated

© Р. Е. Леонов, С. С. Патраков. 2021

control of leaching. The mathematical model rests upon the assumption that metal zing recovery in leaching is governed by the kinetic equation of zinc oxide–sulfuric acid reaction. In the first approximation, kinetics is described using a first-order equation and an equation of material balance in agitator. As a result, a differential equation of the process is derived, as well as a transition curve is plotted and highly accurate approximated using the equation of inertia link of autocontrol. From the theoretical description of the process flow, the equation of zinc recovery in leaching is obtained. Integrating the concentration variation equation allows approximating the mathematical model of leaching at sufficient accuracy by the first-order inertia link, which makes the framework for the design of autocontrol system for leaching.

Key words: Control object, leaching, approximated kinetics, accuracy of approximation by inertia link.

For citation: Leonov R. E., Patrakov S. S. Mathematical model of agitator for sulfuric-acid zinc leaching as a control object. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11-1):366–373. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_366.

Введение

Знание передаточной функции объекта управления необходимо при создании автоматических систем управления и настройки регуляторов в таких системах.

Чаще всего для объектов обогатительной, гидрометаллургической и многих других отраслей промышленности модель объекта управления принимают в виде инерционного звена первого порядка, а иногда инерционного звена первого порядка с запаздыванием. Однако многие технологические процессы имеют более сложный механизм, и поэтому представляет самостоятельный интерес выяснить, насколько такое эмпирическое описание процесса соответствует его физическим свойствам.

Цель исследований

В данной работе сделана попытка на основе теории получить математическую модель объекта управления и сравнить, насколько возможна аппроксимация, которую чаще всего принимают эмпирически.

Методика проведения исследования

Работа выполнена на основе конкретного технологического процесса, а именно получения цинка. Следует отметить, что получение цинка является заключительным этапом добычи руды, обжига руды, наконец выщелачивания огарка. За объект управления принят агитатор, в котором происходит выщелачивание.

Технологическая схема процесса представлена на рис. 1.

В агитатор *2* подается водный раствор серной кислоты с помощью насоса, а с конвейера *1* подаются металлосодержащие (цинкосодержащие) огарки. После этого содержимое агитатора подогревается паром. Затем по окончании процесса выщелачивания пульпа подается на фильтр-пресс *3*, откуда полученный кек сбрасывается на конвейер *4* и направляется в агитатор *6*. В агитатор *6* подается техническая вода, с помощью насоса и с помощью конвейера *7* подается кальцинированная сода. Далее содержимое агитатора подогревается паром. После окончания процесса карбонизации пульпа подается на фильтр-пресс, откуда полученный кек следует на дальнейшую переработку.

Для получения математического описания объекта управления рассмотрим химический процесс, происходящий в агитаторе 2.

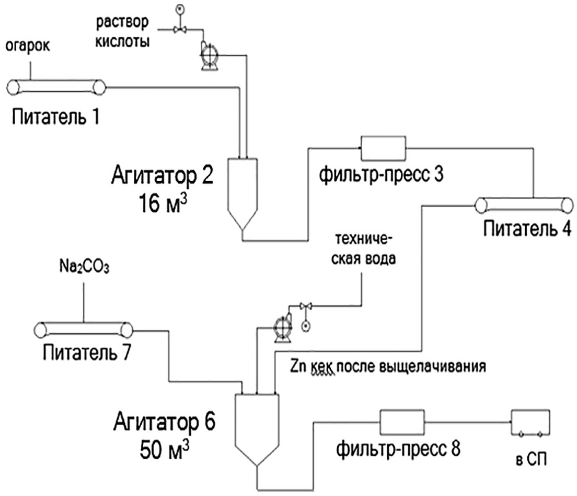

Рис. 1. Схема цепей аппаратов
Fig. 1. Machine flow sheet

Пусть объем агитатора составляет V м^3, и расход поступающего моногидрата — P м^3/с. Будем считать, что рассматривается установившийся режим работы, то есть из агитатора ежесекундно выходит P м^3 раствора. Допустим, что концентрация серной кислоты в поступающем растворе составляет C_0, а в выходном растворе — C_B.

Считая агитатор объектом идеального смешения, примем, что концентрация на выходе одинакова с концентрацией серной кислоты в объеме агитатора. При этом допущении можно составить уравнение материального баланса для агитатора.

Основным процессом, происходящим в агитаторе *2*, является получение сернокислого цинка $ZnSO_4$ и последующее получение из него цинка. Это происходит по следующей реакции:

$$H_2SO_4 + ZnO = ZnSO_4 + H_2O. \quad (1)$$

За время dt в агитатор поступит Pdt моногидрата, что в пересчете на поступившую кислоту составляет C_0Pdt м^3 кислоты. За это же время из агитатора выйдет C_BPdt. Кроме этого следует учесть, что часть кислоты прореагирует с ZnO.

С учетом принятого выше допущения [1—3] о возможности в первом приближении в соответствии с [4—6] считать, что кинетика реакции соответствует уравнению первого порядка, можно составить выражение для баланса по H_2SO_4 [7—9].

$$\frac{dC}{dt} = -KC, \quad (2)$$

где C — текущая концентрация компонента; dC / dt — скорость изменения концентрации; K — коэффициент пропорциональности.

Знак «минус» соответствует убыванию основного компонента.

Предполагалось дальнейшее проектирование системы управления, которая будет реагировать на уровень pH содержимого агитатора *2*, основным веществом для которого является H_2SO_4.

Тогда уравнение (2) принимает следующий вид:

$$\frac{dC_B}{dt} = K\left(C_0 - C_B\right), \quad (3)$$

где C_B — текущая концентрация кислоты, C_0 — начальная концентрация кислоты.

Преобразуя (3), получим

$$\frac{d\frac{n}{V}}{dt} = \frac{C_0P - C_BP - KC_BV}{V}, \qquad (4)$$

где n — количество серной кислоты в агитаторе, измеренное в грамм-молекулах.

Учитывая, что $n / V = C_0$, разделяя переменные и обозначая $x = C_в$, получим:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{C_0P - xP - KxV}{V}$$

$$\text{или } dt = \frac{Vdx}{C_0P - x\left(P + KV\right)}. \qquad (5)$$

После интегрирования (5) в пределах от C_0 до C_B получаем результат изменения концентрации H_2SO_4 во времени в следующем виде:

$$C_B = \frac{C_0}{C_0P - x\left(P + KV\right)}\left(P + KVe^{-\frac{P+KV}{V}t}\right). \qquad (6)$$

Как следует из полученной зависимости (6) и уравнений кинетики, в первом приближении изменение содержания компонентов при реакции выщелачивания соответствует экспоненциальной зависимости [10—12]. Действительно, подставляя в (6) значения, можно видеть экспоненциальное убывание концентрации моногидрата во времени [13—15], а следовательно, и изменение pH раствора. Об этом же свидетельствуют и более сложные модели, приведенные в [1, 16, 17], которые рассматривают гетерогенный характер зависимости концентрации продуктов при выщелачивании.

Экспериментально получены зависимости изменения извлечения цинка во времени [1, 18, 19] (см. кривая *1* на рис. 2). Нетрудно увидеть, что для расчета систем автоматического регулирования эту зависимость с приемлемой точностью можно аппроксимировать зависимостью (см. кривая 2 на рис. 2) в соответствии с источниками [20—22]:

$$x\left(t\right) = A\left(1 - e^{-\frac{t}{25}}\right), \qquad (7)$$

где A = 95, а $x(t)$ — извлечение цинка при выщелачивании, то есть звеном автоматического управления с передаточной функцией:

$$W\left(p\right) = \frac{95}{Tp + 1}, \qquad (8)$$

где постоянная времени T = 25 мин

Надо, однако, иметь в виду, что в соответствии с реакцией (1) для извлечения одной грамм-молекулы ZnO затрагивается одна грамм-молекула моногидрата. Таким образом, с ростом степени извлечения оксида цинка уменьшается концентрация моногидрата, если он искусственно не восполняется. В свою очередь, это означает, что изменение во времени извлечения цинка описывается той же зависимостью, что и убывания концентрации серной кислоты. Убывание серной кислоты приводит к изменению pH раствора [23—25] при выщелачивании.

Выводы

На основании вышеизложенного, а также учитывая возможность аппроксимации агитатора как объекта управления инерционным звеном (см. рис. 2), можно сделать вывод, что для создания системы автоматического регулирования выщелачивания объект управления с достаточной точностью можно аппроксимировать инерционным звеном первого порядка. Целесообразно создание системы управления процесса выщелачивания цинкового огарка по уровню pH в агитаторе с помощью регулирования подаваемого расхода огарка.

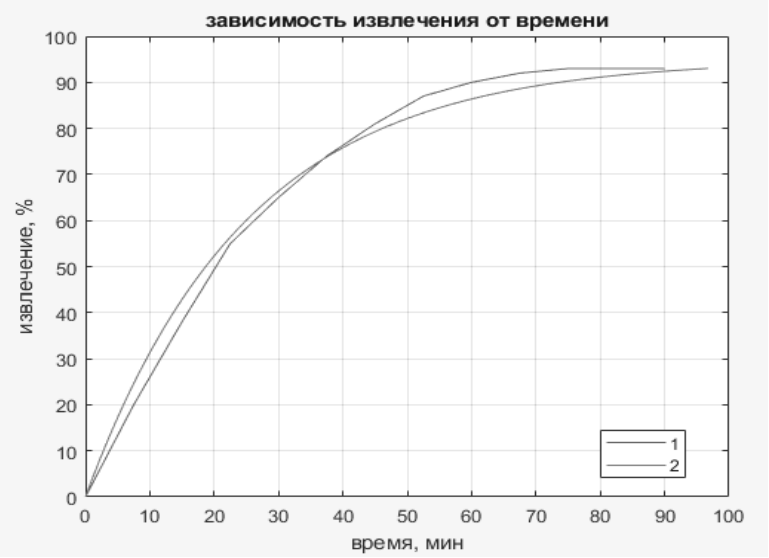

Рис. 2. График зависимости степени извлечения цинка в раствор от продолжительности выщелачивания
Fig. 2. Zinc recovery ion solution versus leaching time

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахтамов Ф. Э.*, *Нишонов Б. У.* К вопросу переработки цинковых кеков // Теория и технология металлургического производства. — 2016. — № 1. — С. 69—72.
2. *Zaitseva, N. A., Ivanova, I. V., Samigullina, R. F., Rotermel, M. V., Krasnenko, T. I.* Synthesis, Crystal and Thermal Properties of Solid Solution Zn2−2xCu2xSiO4 with Willemite Structure//Russian Journal of Inorganic Chemistry— 2019. — №64. DOI:10.1134/S0036023619010224
3. *Козин В. З.*, *Комлев А. С.* Опробование крупнокусковых продуктов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3—1. — С. 410–421. DOI: 10.25018/0236—1493—2020—31—0—410—421.
4. *Амдур А. М.*, *Павлов В. В.*, *Федоров С. А.* Флотация дисперсных капель золота и штейна в расплавах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3—1. — С. 399–409. DOI: 10.25018/0236—1493—2020—31—0—399—409.
5. *Hassan Koohestani, Elahe Sadat Khatami, Kazem Babaei* Comparative investigation of leaching of zinc from wastes of the zinc alloy production process// Mineral Processing and Extractive Metallurgy-2019. — pp.1—7. DOI: 10.1080/25726641.2019.1660506
6. *Затонский А. В.*, *Бовыкин К. В.*, *Асадулин Р. Р.*, *Голубева Е. В.* Разработка и испытания промышленной технологии карбонизации свинцового кека // Цветные металлы. — 2015 .— № 5 .— С. 5558.
7. *Якорнов С. А.*, *Паньшин А. М.*, *Козлов П. А.*, *Ивакин Д. А.*, *Голубева Е. В.* Разработка технологии гидрометаллургической переработки вельц-оксида с получением карбонизированного свинцового кека// Металлург. — 2017 .— № 10 .— С. 60—66.
8. *Кляйн С. Э.*, *Козлов П. А.*, *Набойченко С. С.* Извлечение цинка из рудного сырья — Екатеринбург: УГГУ-УПИ. — 2009. — 492 с.
9. *Amdur A. M.*, *Fedorov S. A.*, *Matushkina A. N.*, *Apakashev R. A.* Behaviour of the gold dispersed drops in the ore on being heated. Non-ferrous Metals. 2016. No. 2. pp. 3–6. DOI: 10.17580/nfm.2016.02.01

10. *Ватолин Н. А.*, *Амдур А. М.* Влияние термической деструкции угля на восстановление оксидов железа из концентратов. Доклады Академии наук, 463(5), 556. DOI: 10.7868/S0869565215230140

11. *Weidong Xing, Man Seung Lee*. Leaching of gold and silver from anode slime with a mixture of hydrochloric acid and oxidizing agents// Geosystem Engineering. -2017. -№ 20(4). — pp.216—223. DOI: 1 0.1080/12269328.2017.1278728

12. *Harrison Hodge, Peter C*. Hayes, William Hawker, James Vaughan. The DSP concentrate sinter-leach process for aluminium and sodium recovery 2: leaching behavior// Mineral Processing and Extractive Metallurgy. — 2020. — pp.1—10. DOI: 10.1080/25726641.2020.1791681

13. *Матушкина А. Н.*, *Амдур А. М.*, *Цыпин Е. Ф.* Показатели обогащения материала с преобладанием тонкодисперсного золота до и после тепловой обработки на примере карбонатно-силикатной руды // Горный журнал. — 2016. — № 12. — С. 9—13.

14. *Mungall, J. E., Brenan J. M.*, *Godel B.*, *Barnes S. J.*, *Gaillard F.* Transport of metals and sulphur in magmas by flotation of sulphide melt on vapour bubbles // Nature Geoscience, 2015, Vol. 8, Issue 3, pp. 216—219.

15. *Амдур А. М.*, *Ватолин Н. А.*, *Федоров С. А.*, *Матушкина А. Н.* Движение дисперсных капель золота в пористых телах и оксидных расплавах при нагреве // Доклады Академии наук. — 2015. — Т. 465, № 3. — С. 307–309.

16. *Козин В. З.*, *Комлев А. С.* Комбинированный способ отбора проб продуктов обогащения и оборудования для его реализации. // Обогащение руд. 2014. №3. С. 28—32.

17. *Козин В. З.*, *Комлев А. С.* Определение коэффициентов вариации массовой доли компонентов в продуктах обогащения. // Обогащение руд. 2019. №1. С. 28—33.

18. *Brochot S.* Sampling for metallurgical test: how the test results can be used to estimate their confidence level. XXVIII International Mineral Processing Congress. Quebec City, Canada, 2016. Paper ID 438.

19. *Yong Qiao, Jiang Diao, Deman Liu, Jianfeng Yang, Dongwei Guo, Siyu Gong, Bing Xie* Dephosphorisation of steel slags by leaching with sulphuric acid // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. — 2018 — № 127(4), pp. 250—254. DOI: 10.1080/03719553.2017.1412096

20. *B. Wang, Y. L. Hao, W. Q. Chu, S. Rong, H. L. Sun* Kinetics of leaching of 20CaO·13Al2O3·3MgO·3SiO2, Mineral Processing and Extractive Metallurgy. — 2017. — № 126(4), pp. 199—204. DOI: 10.1080/03719553.2016.1220448

21. *Ning Peng, Bing Peng, Hui Liu, Ke Xue, Dong Chen, Dong-Hong Lin* Reductive roasting and ammonia leaching of high iron-bearing zinc calcines//Mineral Processing and Extractive Metallurgy. — 2018. — № 127(1), pp. 1—9. DOI: 10.1080/03719553.2016.1258136

22. *Пелевин А. Е.* Получение гематитового концентрата из гематит-магнетитовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 3—1. — С. 422–430. DOI: 10.25018/0236—1493—2020—31—0—422—430.

23. *Пелевин А. Е.*, *Сытых Н. А.* Испытания двухстадиальной схемы измельчения титаномагнетитовой руды // Обогащение руд. — 2018. — № 2. — С. 13–18. DOI: 10.17580/ or.2018.02.03.

24. *Пелевин А. Е.* Пути повышения эффективности технологии обогащения железорудного сырья // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. Т. 75, № 2. С. 137–146

25. *Прокопьев С. А.*, *Пелевин А. Е.*, *Напольских С. А.*, *Гельбинг Р. А.* Стадиальное выделение магнетитового концентрата с использованием винтовой сепарации // Обогащение руд. — 2018. — № 4. — С. 28–33. DOI: 10.17580/or.2018.04.06. ГИАБ

REFERENCES

1. Akhtamov F. E., Nishonov B. U. On the issue of zinc cake processing. Theory and technology of metallurgical production. 2016; (1): 69—72. [In Russ].
2. Zaitseva, N. A., Ivanova, I. V., Samigullina, R. F., Rotermel, M. V., Krasnenko, T. I. Synthesis, crystal and thermal properties of solid solution Zn2−2xCu2xSiO4 with willemite structure. Russ. J. Inorg. Chem. 2019; (64). [In Russ]. DOI:10.1134/S0036023619010224
3. Kozin, V. Z., Komlev, A. S. Lumpy products testing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020; (3—1): 410—421. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236—1493—2020—31—0—410—421.
4. Amdur A. A., Pavlov V. V., Fyodorov S. A. Flotation of dispersed gold drops in melts as an element of technological scheme of enrichment. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020; (3—1): 399—409. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236—1493—2020—31—0—399—409
5. Hassan Koohestani, Elahe Sadat Khatami, Kazem Babaei Comparative investigation of leaching of zinc from wastes of the zinc alloy production process. *Mineral Processing and Extracting Metallurgy*. 2019; pp.1—7. DOI: 10.1080/25726641.2019.1660506
6. Zatonskiy A. V., Bovykin K. V., Asadulin R. R., Golubeva E. V. Development and testing of industrial technology for lead cake carbonization. Russ. J. Non-ferr. Met. 2015; (5): 55—58. [In Russ].
7. Yakornov S. A., Panshin A. M., Kozlov P. A., Ivakin D. A., Golubeva E. V. Development of technology for hydrometallurgical processing of waelz-oxide to obtain carbonized lead cake. *Metallurgist*. 2017; (10): 60—66. [In Russ].
8. Klyain S. E., Kozlov P. A., Naboychenko S. S. Zinc extraction from crude ore. Yekaterinburg, UGGU-UPI Publ. 2009; p. 492. [In Russ].
9. Amdur A. M., Fyodorov S. A., Matushkina A. N., Apakashev R. A. Behaviour of the gold dispersed drops in the ore on being heated. Russ. J. Non-ferr. Met. 2016; (2): 3–6. [In Russ]. DOI: 10.17580/nfm.2016.02.01
10. Vatolin, N. A., Amdur, A. M. The effect of thermal coal destruction on the reduction of iron oxides from concentrates. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 463 (5), 556. [In Russ].
11. Weidong Xing, Man Seung Lee. Leaching of gold and silver from anode slime with a mixture of hydrochloric acid and oxidizing agents. *Geosystem Engineering*. 2017; no 20(4), pp.216—223. DOI: 10.1080/12269328.2017.1278728
12. Harrison Hodge, Peter C. Hayes, William Hawker, James Vaughan. The DSP concentrate sinter-leach process for aluminium and sodium recovery 2: leaching behavior. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2020; pp.1—10. DOI: 10.1080/25726641.2020.1791681
13. Matushkina A. N., Amdur A. M., Zypin E. F. Indictors of material enrichment with predominance of finely dispersed gold before and after the heat treatment, with carbonate-silicate ore being used as an example. *Gorhyj Journal*. 2016; (12): 9—13. [In Russ].
14. Mungall, J. E., Brenan J. M., Godel B., Barnes S. J., Gaillard F. Transport of metals and sulphur in magmas by flotation of sulphide melt on vapour bubbles. *Nature Geoscience*. 2015, Vol. 8, Issue 3, pp. 216—219.
15. Amdur A. M., Vatolin, N. A., Fyodorov S. A., Matushkina A. N. Behaviour of dispersed drops of gold in the porous bodies and oxide melts in the process of heating. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences*. 2015, vol. 465, no.3, pp. 307—309. [In Russ]
16. Kozin, V. Z., Komlev, A. S. Combined method for the selection of samples of mineral-dressing products and the equipment for its implementation. *Obogashcheniye Rud* [Ore Processing]. 2019; (3): 28—32. [In Russ].
17. Kozin, V. Z., Komlev, A. S. Determination of variation coefficients of a mass fraction of components in the concentrates. *Obogashcheniye Rud* [Ore Processing]. 2019; (1): 28—33. [In Russ].

18. Brochot S. Sampling for metallurgical test: how the test results can be used to estimate their confidence level. XXVIII International Mineral Processing Congress. Quebec City, Canada, 2016. Paper ID 438.

19. Yong Qiao, Jiang Diao, Deman Liu, Jianfeng Yang, Dongwei Guo, Siyu Gong, Bing Xie. Dephosphorisation of steel slags by leaching with sulphuric acid. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2018 no. 127(4), pp. 250—254. DOI: 10.1080/03719553.2017.1412096

20. B. Wang, Y. L. Hao, W. Q. Chu, S. Rong, H. L. Sun Kinetics of leaching of 20CaO·13Al2O3·3MgO·3SiO2, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2017; no. 126(4): 199—204. DOI: 10.1080/03719553.2016.1220448

21. Ning Peng, Bing Peng, Hui Liu, Ke Xue, Dong Chen, Dong-Hong Lin. Reductive roasting and ammonia leaching of high iron-bearing zinc calcines. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2018; no. 127(1): 1—9. DOI: 10.1080/03719553.2016.1258136

22. Pelevin A. E. Obtaining hematite concentrates from hematite-magnetite ores. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020; (3—1): 422—430. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236—1493—2020—31—0—422—430.

23. Pelevin A. E., Sytykh N. A. Testing of a two-stage scheme for grinding titanomagnetite ore. *Obogashcheniye Rud* [Ore Processing]. 2018; (2): 13—18. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2018.02.03.

24. Pelevin A. E. Ways of increasing the efficiency of iron ore raw materials processing technology. *Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical, and economic information.* 2019, vol.75, no.2, pp.137—146. [In Russ].

25. Prokopyev S. A., Pelevin A. E., Napolskikh S.A, Gelbing P. A. Stage separation of magnetite concentrate with the use of screw separation *Obogashcheniye Rud* [Ore Processing]. 2018; (4): 28—33. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2018.04.06.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Леонов Рафаил Ефимович[1] — канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры Автоматики и компьютерных технологий, lprep2011@mail.ru;
Патраков Семен Сергеевич[1] — магистрант по специальности Автоматическое управление кафедры Автоматики и компьютерных технологий;
[1] Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Leonov R. E.[1], Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor at the Automation and Computer Technologies Department, e-mail: lnprep2011@yandex.ru;
Patrakov S. S.[1], Master's Degree Student in Automatic control, Automation and Computer Technologies Department;
[1] Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.

Получена редакцией 01.06.2021; получена после рецензии 16.06.2021; принята к печати 10.10.2021.
Received by the editors 01.06.2021; received after the review 16.06.2021; accepted for printing 10.10.2021.