



Научная статья
УДК 669:519.216
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-669-676>

Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое методом математического моделирования

Владимир Михайлович Алкацев^{1✉}, Александр Леонидович Рутковский²,
Алла Константиновна Макоева³

¹⁻³Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), г. Владикавказ, Россия

¹avm340@mail.ru

²rutkowski@mail.ru

³makoeva_alla@mail.ru

Резюме. Цель – стабилизация процесса обжига цинковых сульфидных концентратов в печах кипящего слоя при использовании обогащенного кислородом дутья. Баланс между заданным (в среднем 20%) избытком воздушного дутья и количеством загрузки шихты устанавливается за счет подбора количества элементов испарительного охлаждения печи кипящего слоя – кессонов. Данные о влиянии избытка кислорода в дутье на качество обжига сульфидных концентратов и влияние количества дутья на физическое состояние кипящего слоя были получены путем изучения научно-технической информации и обзора литературных источников по теме исследования. Статистические данные для исследования получены в результате анализа производственного опыта работы печей кипящего слоя ОАО «Электроцинк». Произведен расчет теплового баланса обжига. При данном расчете были учтены основные технические характеристики печей кипящего слоя, применяемых для обжига цинковых сульфидных концентратов: уровень кипящего слоя, число сопел, диаметр печи, диаметр в зоне слоя, толщина подины и общая масса печи. На основании полученных в результате изучения производственных данных работы печей кипящего слоя предложен способ регулирования подачи кислорода в зависимости от количества загружаемой шихты. Регулирование подачи кислорода производится с целью обеспечения стабильного избытка кислорода в дутье без заметного изменения количества дутья, и, как следствие, максимального удаления серы из шихты. Установлено, что снижение избытка дутья ниже 15% влечет за собой значительное ухудшение качества получаемого огарка и пыли, а увеличение свыше 20% приводит к снижению содержания SO₂ в отходящих газах без заметного улучшения качества огарка. Таким образом, предлагаемый способ регулирования подачи кислорода в печь будет способствовать улучшению технико-экономических показателей процесса обжига цинковых сульфидных концентратов в печах кипящего слоя.

Ключевые слова: цинковый концентрат, обжиг, кислород, температура, шихта, кипящий слой, математическое моделирование, оптимизация

Для цитирования: Алкацев В. М., Рутковский А. Л., Макоева А. К. Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое методом математического моделирования // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 4. С. 669-676. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-669-676>.

METALLURGY

Original article

Mathematical modeling of zinc concentrate roasting in a fluidized bed

Vladimir M. Alkatsev^{1✉}, Alexander L. Rutkovsky², Alla K. Makoeva³

¹⁻³North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

¹avm340@mail.ru

²rutkowski@mail.ru

³makoeva_alla@mail.ru

Abstract. The paper aims to stabilize the roasting of zinc sulfide concentrates in fluidized-bed furnaces using oxygen-enriched air. The balance between the given excess air blast (on average 20%) and the amount of loaded charge is achieved by selecting an appropriate number of evaporative cooling elements in the fluidized-bed furnace. Through the evaluation of scientific and technical information, as well as literature sources on the research topic, data were collected on the effects produced by an oxygen excess in the blast on the quality of sulfide concentrate roasting and by a blast volume on the state of the fluidized bed. In addition, statistical data for the study were obtained by analyzing the operation of fluidized-bed furnaces at ElectroZinc. As part of the study, the heat balance in roasting was determined, taking into account the following technical characteristics of fluidized-bed furnaces used for roasting zinc sulfide concentrates: fluidized-bed level, number of nozzles, furnace diameter, diameter in the bed zone, hearth thickness, and the total weight of the furnace. Relying on the operation analysis of fluidized-bed furnaces, a method was proposed to regulate the oxygen supply depending on the amount of loaded charge. The oxygen supply is regulated in order to ensure a stable excess of oxygen in the blast without causing any significant changes in the blast volume and, consequently, to maximize the sulfur removal from the charge. A decrease in the excess air blast below 15% was found to significantly degrade the quality of the resulting cinder and dust, while an increase of over 20% reduced the SO₂ content in the exhaust gases with no noticeable improvement in the quality of cinder. Therefore, the proposed method for regulating the oxygen supply to the furnace can improve the techno-economic performance of zinc sulfide concentrate roasting in fluidized-bed furnaces.

Keywords: zinc concentrate, roasting, oxygen, temperature, charge, fluidized bed, mathematical modeling, optimization

For citation: Alkatsev V. M., Rutkovsky A. L., Makoeva A. K. Mathematical modeling of zinc concentrate roasting in a fluidized bed. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):669-676. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-4-669-676>.

ВВЕДЕНИЕ

Металлический цинк используется в различных отраслях промышленности. Технологическая схема его получения включает предварительный обжиг сульфидных цинковых концентратов в печах кипящего слоя (КС), характеризующихся высокими технико-экономическими показателями⁴ [1–9].

Важнейшими факторами, обеспечивающими качество получаемого в печах КС огарка и пыли являются температура и избыток дутья, показателем которого служит содержание кислорода под сводом печи⁵ [10–12].

Температура в печи регулируется изменением количества подаваемой в печь шихты⁵. Сульфиды металлов, содержащиеся в шихте, фактически являются топливом, так как при их окислении выделяется большое количество тепла. Баланс между воздушным дутьем с заданным избытком и количеством загрузки устанавливается за счет подбора количества элементов испарительного охлаждения – кессонов. Это делается для того, чтобы при оптимальном и неизменном коли-

честве дутья в печь избыток дутья составлял в среднем 20%. Снижение избытка дутья ниже 15% влечет за собой значительное снижение качества огарка и пыли, а увеличение свыше 20% снижает содержание SO₂ в отходящих газах без заметного улучшения качества обжига⁶ [13].

Печи кипящего слоя, предназначенные для окислительного обжига сульфидных концентратов, относятся к классу агрегатов для автогенных процессов, в которых тепло, необходимое для поддержания рабочей температуры, появляется в результате химических реакций в самой печи. Сульфиды цветных металлов, содержащиеся в концентратах, окисляются кислородом дутья. В результате этого огарок содержит оксиды металлов, чаще всего высшей степени окисления, а в газовую фазу переходит сера в виде SO₂ [1]. Помимо обжига, в печах КС тяжелые цветные металлы перерабатываются различными методами и из различного сырья с получением различных продуктов⁷ [14–20].

⁴Nyberg J. Characterisation and control of the zinc roasting process [Электронный ресурс]. URL: https://kipdf.com/characterisation-and-control-of-the-zinc-roasting-process_5ac47aeb1723dddb8e77b615.html (29.03.2022).

⁵Худяков И. Ф., Тихонов А. И., Деев В. И., Набойченко С. С. *Металлургия меди, никеля и кобальта: учеб. пособ.* М.: Изд-во «Металлургия», 1977. 405 с.

⁶Кляйн С. Я., Козлов П. А., Набойченко С. С. *Извлечение цинка из рудного сырья: учебник для вузов.* Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2009. 492 с.

⁷Алымов М. И., Левинский Ю. В., Набойченко С. С., Касимцев А. В., Панов В. С., Оглезнева С. А. [и др.]. *Металлические порошки и порошковые материалы: справочник.* М.: Изд-во «Научный мир», 2018. 608 с.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обжиг в печах кипящего слоя – это процесс, относящийся к разряду многомерных нестационарных динамических объектов. Временное отставание информации о качественных параметрах продуктов обжига, неполное понимание взаимосвязи выходных параметров с режимами работы печи, значительное число неконтролируемых возмущений, ограниченное количество возможностей управления процессом – все это значительно затрудняет ведение процесса в оптимальном режиме [2].

Особенностью, характеризующей современное цинковое производство, является переработка концентратов различных месторождений разного состава, имеющих неодинаковые физические свойства и химический состав. Это требует вносить изменения в контроль над процессом обжига концентратов⁸.

В таблице приведены основные технические характеристики печей КС для обжига концентратов.

Выгружаемый из печи огарок имеет непостоянный химический состав. В связи с этим в технологической схеме получения Zn могут возникнуть отклонения от существующих параметров процесса [7]. Следовательно, проведение обжига в оптимальном режиме должно базироваться на результатах анализа характеристик объекта исследований.

Для успешного протекания окислительных реакций и максимального удаления серы необходим избыток дутья с коэффициентом $1,2 \pm 0,5$ от стехиометрического соотношения. С учетом коэффициента избытка дутья удельный расход воздуха составляет 1600–1700 м³/т обжигаемого концентрата [7]. Согласно данным⁹, суммарное содержание кислорода в отходящих от печей КС газах может достигать 2–4%.

Для автоматического регулирования температуры в печи необходимо контролировать изменение количества подаваемой шихты.

Для обеспечения устойчивой работы печи кипящего слоя необходимо в процессе обжига подавать шихту в печь непрерывно и постоянно.

Как было установлено ранее [7, 8], тепловой баланс в установившемся режиме:

$$Gtqt + Gvcvtv + Gtcttt = Gctf, \quad (1)$$

где Gt – расход концентрата, кг/с; qt – теплопроводная способность концентрата, кДж/кг; Gv – расход воздуха, кг/с; cv – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·°C); tv – температура воздуха, °C; ct – теплоемкость концентрата, кДж/(кг·°C); tt – температура концентрата, °C; $G = Gt + Gv$ – расход продуктов обжига, кг/с; c – теплоемкость продуктов обжига кДж/(кг·°C); tf – температура в кипящем слое, °C.

Количество тепла, поступающее с шихтой и воздухом и выделяющееся при горении сульфидов, будет соответствовать количеству тепла, уносимого с отходящими газами и в виде потерь через футеровку, а также теплу, отводимому кессонами печи.

Тогда температуру в кипящем слое можно определить следующим образом:

$$tf = \frac{Gt qt + Gv cv tv + Gt ct tt}{(Gt + Gv)c}. \quad (2)$$

Данное количество теплоты имеет незначительную величину в сравнении с производением $Gtqt$. Следовательно, этот показатель можно не учитывать. Также принимаем, что теплоемкость продуктов обжига не зависит от температуры, т.е. постоянна во всем интервале температур¹⁰ [8].

Следовательно, возможно рассчитать основные параметры процесса обжига в печи

⁸Барон Н. М., Пономарева А. М., Равдель А. А., Тимофеева З. Н. Краткий справочник физико-химических величин. СПб.: Изд-во «Иван Федоров», 2003. 182 с.

⁹Шиврин Г. Н. Металлургия свинца и цинка: учебник для техникумов цветной металлургии. М.: Изд-во «Металлургия», 1982. 352 с.

¹⁰Крестовников А. Н., Владимиров Л. П., Гуляницкий Б. С., Фишер А. Я. Справочник по расчетам равновесий металлургических реакций. М.: Изд-во «Металлургиздат», 1963. 416 с.

Технические характеристики печей кипящего слоя
Specifications of fluidized bed furnaces

Показатели	Площадь пода, м ²				
	38'	35,6'	29'	22''	16,5'''
Уровень кипящего слоя, мм	1200	1200	1200	1500	1500
Температура кипящего слоя, °С	900	900-950	1000	1000	1500
Число воздушных камер	2	2	2	2	2
Число сопел, шт.	2137	–	–	1165	865
Диаметр печи, мм	7600	–	–	6560	5840
Диаметр в зоне слоя, мм	6636	6500	5820	4000	4200
Толщина подины, мм	250	250	250	250	250
Общая масса печи, т	286	–	–	360	–

* – для обжига цинковых концентратов;

** – для обжига никелевых концентратов;

*** – для обжига медных концентратов.

КС. Количество железа, связанное с серой в виде FeS₂:

$$Fe_{FeS_2} = (S - 0,49Zn - 0,16Pb - 0,01Cu) \cdot 0,8, \quad (3)$$

где *S, Zn, Pb, Cu* – содержание в шихте серы, цинка, свинца и меди, соответственно, %.

Количество Fe в CuFeS₂:

$$Fe_{CuFeS_2} = 0,88Cu. \quad (4)$$

Суммарное количество сульфидного железа:

$$SumFe = Fe_{FeS_2} + Fe_{CuFeS_2}. \quad (5)$$

Теоретически необходимое количество O₂, требуемое для окисления сульфидов концентрата, определяется как:

$$O_{2T} = 0,734Zn + 0,232Pb + 1,576SumFe + 1,511Cu; \quad (6)$$

$$V_{O_{2T}} = \frac{22,4O_{2T}}{32}. \quad (7)$$

Теоретически необходимое количество для окисления концентрата:

$$V_{vozdT} = 3,762V_{O_{2T}} + V_{O_{2T}}. \quad (8)$$

Реальное же количество воздуха, необходимое для окисления концентрата, определяется так [7]:

$$V_{vozdD} = V_{vozdT} \alpha; \quad (9)$$

$$V_{O_{2D}} = 0,21V_{vozdD}; \quad (10)$$

$$O_{2D} = O_{2T} \rho_{O_2},$$

где α – коэффициент избытка дутья; ρ_{O_2} – плотность O₂, кг/м³.

Теплотворная способность концентрата (Q_{xt} , кДж/кг):

$$Q_{xt} = 129,3S + 10,09Zn + 28,1Cu + 10,5Pb.$$

Расход воздуха:

$$V_V = \frac{10V_{vozdD} \rho_V G t^{24}}{1440 f_1 60},$$

где ρ_V – плотность воздуха, кг/м³; f_1 – коэффициент нахождения печи под дутьем.

Для проверки результатов использованы практические данные завода ОАО «Электроцинк», где печи перерабатывали шихту следующего состава, % масс.: *Zn* – 50,0; *Pb* – 1,5; *S* – 32,0; *Cu* – 1,0. Остальное – до 100%: Fe, SiO₂, Cd, Co, Sb, As, O.

В результате определили основные режимные параметры процесса.

Количество Fe, связанное с серой в пирите:

$$Fe_{FeS_2} = (S - 0,49Zn - 0,16Pb - 0,01Cu) \times 0,8 = 6,38 \text{ кг.}$$

Количество Fe в $CuFeS_2$:

$$Fe_{CuFeS_2} = 0,88Cu = 0,88 \text{ кг.}$$

Общее количество железа в виде сульфидных минералов:

$$SumFe = Fe_{FeS_2} + Fe_{CuFeS_2} = 7,26 \text{ кг.}$$

Теоретически необходимое количество кислорода, необходимое для окисления сульфидов концентрата, составляет:

$$O_{2T} = 0,734Zn + 0,232Pb + 1,576SumFe + 1,511Cu = 50 \text{ кг;}$$

$$V_{O_{2T}} = \frac{O_{2T} \cdot 22,4}{32} = 35 \text{ м}^3.$$

Тогда количество воздуха, необходимое для окисления всего концентрата:

$$V_{vozdT} = V_{O_{2T}} \cdot 3,762 + V_{O_{2T}} = 166,67 \text{ м}^3.$$

Практическое количество воздуха, необходимое для окисления сульфидов концентрата, составляет:

$$V_{vozdB} = 200 \text{ м}^3.$$

Теплотворная способность концентрата:

$$q_t = 129,3S + 10,09Zn + 28,1Cu + 10,5Pb = 4677 \text{ кДж/кг.}$$

Расход воздуха:

$$V_V = \frac{10V_{vozdB} \rho_V Gt_{24}}{1440 f_1 60} = 5,5 \text{ кг/с.}$$

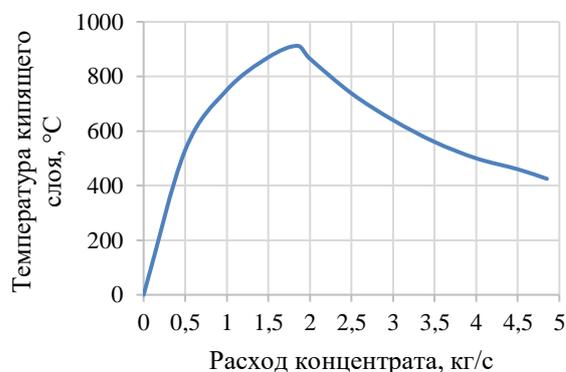
Для полного окисления 1,85 кг Zn концентрата необходимо 5,5 кг воздуха, поэтому количество воздуха для полного окисления 1 кг концентрата составит 2,99 кг. Произведение $Gtqt$ будет зависеть от расхода воздуха

G_v до того периода, пока этот расход не станет равным 5,5 кг/с. Данная зависимость определяется¹¹ пропорцией $\frac{1}{2,99} = \frac{Gt}{G_v}$, $Gt = \frac{G_v}{2,99}$.

При расчете температуры КС соотношение (2) использовали компьютерную программу MathCad [7, 8]:

$$T_f(G_v) := \begin{cases} T_f \leftarrow \frac{\frac{G_v}{2,99} \cdot qt + G_v \cdot cv \cdot tv}{(GT + G_v)c} & \text{if } G_v \leq 5.5 \\ T_f \leftarrow \frac{GT \cdot qt + G_v \cdot cv \cdot tv}{(GT + G_v)c} & \text{otherwise} \end{cases}$$

На рисунке приведена зависимость температуры слоя от расхода на обжиг сульфидного цинкового концентрата.



Зависимость температуры слоя от расхода концентрата
Bed temperature vs concentrate consumption

Экстремальная точка на графике, после которой при увеличении количества подаваемой шихты начинает происходить «лавинообразный» спад температуры, объясняется нехваткой кислорода для окисления избыточного количества концентрата. Загружаемое в печь избыточное количество влажной шихты отнимает тепло, расходуемое на ее нагрев и испарение воды¹².

¹¹Трусова П. В. Введение в математическое моделирование: учеб. пособ. М.: «Университетская книга»; «Логос», 2007. 439 с.

¹²Набойченко С. С., Агеев Н. Г., Карелов С. В., Мамяченков С. В. Сергеев В. А. Процессы и аппараты цветной металлургии. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2013. 564 с.

Регулирование загрузки производится автоматически, что дает возможность поддерживать оптимальную температуру в интервале $\pm 20...-25^\circ$. Но если задача поддержания температуры выполняется достаточно легко, независимо от каких-либо других возмущающих факторов, то избыток дутья изменяется от: изменения влажности концентрата, нестабильности работы механизмов загрузки, и, самое главное, от скорости работы средств автоматики, поддерживающей температуру. В зависимости от конструкции питателя и влажности концентрата в печь одновременно может попасть ком концентрата весом до 3 кг, и потом образоваться пауза в загрузке до 2 с. При среднем темпе загрузки около 3 кг/с – это значительное относительное изменение. Кроме того, запаздывание изменения температуры в печи от изменения загрузки достигает 10 с, количество загружаемой в печь шихты все это время может быть заниженным или завышенным на десятки процентов. Колебания в загрузке, инициируемые средствами автоматики, могут достигать до 50% от среднего уровня при нормальной работе и до 100% при экстремальных отклонениях температуры. На температуру в печи подобные колебания осо-

бого воздействия не оказывают потому, что масса огарка в печи среднего размера превышает 200 т, а вот содержание кислорода под сводом регулярно на $1\div 2$ с падает до 0, и в это время вся пыль, выходящая из печи, остается недообожженной. Неслучайно даже по нормам содержание сульфидной серы в пыли допускается на порядок выше, чем в огарке (Ss в огарке – 0,2%, Ss в пыли – 3%). При пылеуносе, достигающем 60÷70%, содержание сульфидной серы в пыли оказывается главным показателем качества продуктов обжига.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При обогащении дутья кислородом в печи кипящего слоя для обжига цинковых сульфидных концентратов проблема низкого качества пыли может быть решена с помощью создания системы регулирования количества подаваемого с дутьем кислорода в зависимости от показаний весоизмерителя на питателе загрузки шихты. Таким образом, будет обеспечена возможность при любых колебаниях загрузки гарантировать стабильный избыток кислорода под сводом печи и, как следствие, более качественный обжиг.

Список источников

1. Fleissner F., Eberhard P. Load balanced parallel simulation of particle-fluid DEM-SPH systems with moving boundaries // *Parallel Computing: Architectures, Algorithms and Applications: Proceedings of Conference (Julich, 4–7 September 2007)*. Julich, 2007. Vol. 38. P. 37–44.
2. Алкацев М. И., Алкацева В. М. Исследование зависимости показателей обжига сульфидных никелевых концентратов в печах кипящего слоя от различных факторов методом планируемого имитационного эксперимента // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2009. № 3. С. 60–63.
3. Constantineau J. P., Bouffard S. C., Grace J. R., Richards G. G., Lim C. Jim. Demonstration of the conditions conducive to agglomeration of zinc calcine in fluidized bed roasters // *Minerals Engineering*. 2011. Vol. 24. Iss. 13. P. 1409–1420. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.06.002>.
4. Chen T. T., Dutrizac J. E. Mineralogical changes occurring during the fluid-bed roasting of zinc sulfide concentrates // *JOM*. 2004. Vol. 56. Iss. 12. P. 46–51. <https://doi.org/10.1007/s11837-004-0235-y>.
5. Davies R. H., Dinsdale A. T., Gisby J. A., Robinson J. A. J., Martin S. M. MTDATA - thermodynamic and phase equilibrium software from the national physical laboratory // *Calphad*. 2002. Vol. 26. Iss. 2. P. 229–271. [https://doi.org/10.1016/S0364-5916\(02\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(02)00036-6).
6. Svens K., Kerstiens B., Runkel M. Recent experiences with modern zinc processing technology // *Erzmetall*. 2003. Iss. 2. P. 94–103.
7. Рутковский А. Л., Дюнова Д. Н., Бигулов А. В., Яковенко И. С., Билаонов Б. Д., Дзантиев С. Ш. Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое методом математического моделирования // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2013. № 3. С. 217–222.
8. Герасименко Н. П., Рутковский А. Л. Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое с целью оптимизации // *Науч.-техн. конф. обучающихся и молодых ученых СКГМИ «НТК-2018»: сб. докл. по итогам науч.-иссл. работ (г. Владикавказ, 17–25 мая 2018 г.)*. Владикавказ: Изд-во Северо-Кавказского горно-металлургического института, 2018. С. 13–17.
9. Ивакина С. А., Мунц В. А. Печь кипящего слоя для обжига цинковых концентратов как объект регулирования // *Известия Томского политехнического*

- университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 9. С. 31–42.
<https://doi.org/10.18799/24131830/2018/9/2086>.
10. Кубашевский О., Олкок С. Б. *Металлургическая термодинамика / пер. с англ.* М.: Изд-во «Металлургия», 1982. 392 с.
11. Седов Л. И. *Методы подобия и размерности в механике.* М.: Изд-во «Наука», 1977. 440 с.
12. Пестунова Н. П., Ремизов Ю. С., Комков Н. М. О механизме обжига цинковых концентратов в печах кипящего слоя // *Комплексное использование минерального сырья.* 1990. № 8. С. 55–60.
13. Панышин А. М., Шакирзянов Р. М., Избрехт П. А., Затонский А. В. Основные направления совершенствования производства цинка на ОАО «Челябинский цинковый завод» // *Цветные металлы.* 2015. № 5. С. 19–21.
<https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.03>.
14. Boateng A. A. *Rotary kilns: transport phenomena and transport processes.* Amsterdam: Elsevier Science, 2015. 369 p.
15. Orhan G. Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium // *Hydrometallurgy.* 2005. Vol. 78. Iss. 3-4. P. 236–245.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.03.002>.
16. Krasheninina A. G., Khalezov B. D., Bornovolokov A. S., Ordinartsev D. P. Technology for extracting manganese from vanadium converter slag after leaching vanadium // *Metallurgist.* 2019. Vol. 63. Iss. 5. P. 534–542.
<https://doi.org/10.1134/S0036029520010073>.
17. Панышин А. М., Видуцкий М. Г., Козлов Д. А., Ивакин Д. А. Использование флотации цинковых кеков в аппаратах колонного типа для повышения эффективности вельц-процесса // *Цветные металлы.* 2015. № 5. С. 59–64. <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.12>.
18. Козлов П. А., Казанбаев Л. А., Затонский В. А., Травкин В. Ф. Экстракционно-электролизные методы переработки цинкового сырья. М.: Изд-во «Руда и металлы», 2008. 269 с.
19. Farkhondehkavaki M., Soleimani M., Latifi M., Berruti F., Briens C., McMillan J. Characterization of moisture distribution in a fluidized bed // *Measurement.* 2014. Vol. 47. Iss. 1. P. 150–160. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.063>.
20. Молодцова М. Ю., Добрыднев С. В. Условия получения основных карбонатов цинка из аммиачно-карбонатных водных растворов // *Успехи в химии и химической технологии.* 2013. Т. 27. № 7. С. 102–105.

References

1. Fleissner F., Eberhard P. Load balanced parallel simulation of particle-fluid DEM-SPH systems with moving boundaries. In: *Parallel Computing: Architectures, Algorithms and Applications: Proceedings of Conference.* 4–7 September 2007, Julich. Julich; 2007, vol. 38, p. 37–44.
2. Alkatsev M. I., Alkatseva V. M. An investigation of the dependence of roasting characteristics of sulfide nickel concentrates in fluidized bed furnaces on various factors by the method of design imitation experiment. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy.* 2009;3:60-63. (In Russ.).
3. Constantineau J. P., Bouffard S. C., Grace J. R., Richards G. G., Lim C. Jim. Demonstration of the conditions conducive to agglomeration of zinc calcine in fluidized bed roasters. *Minerals Engineering.* 2011;24(13): 1409-1420. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.06.002>.
4. Chen T. T., Dutrizac J. E. Mineralogical changes occurring during the fluid-bed roasting of zinc sulfide concentrates. *JOM.* 2004;56(12):46-51. <https://doi.org/10.1007/s11837-004-0235-y>.
5. Davies R. H., Dinsdale A. T., Gisby J. A., Robinson J. A. J., Martin S. M. MTDATA – thermodynamic and phase equilibrium software from the national physical laboratory. *Calphad.* 2002;26(2):229-271. [https://doi.org/10.1016/S0364-5916\(02\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0364-5916(02)00036-6).
6. Svens K., Kerstiens B., Runkel M. Recent experiences with modern zinc processing technology. *Erzmetall.* 2003;2:94-103.
7. Rutkovsky A. L., Dyunova D. N., Bigulov A. V., Yakovenko I. S., Bilaonov B. D., Dzantiev S. Sh. Investigation of the roasting process of zinc concentrates in a fluidized bed by mathematical modeling. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal).* 2013;3:217-222.
8. Gerasimenko N. P., Rutkovskij A. L. Investigation of zinc concentrate roasting in a fluidized bed for the purpose of optimization. In: *Nauchno-tekhnicheskaya konferenciya obuchayushchihsiya i molodyh uchenyh SKGMI "NTK-2018": sbornik dokladov po itogam nauchno-issledovatel'skih rabot = Scientific and technical conference of students and young scientists of North Caucasian Mining and Metallurgical Institute "STC-2018": collected reports on the results of scientific research works.* 17–25 May 2018, Vladikavkaz. Vladikavkaz: North Caucasian Mining and Metallurgical Institute; 2018, p. 13-17. (In Russ.).
9. Ivakina S. A., Munts V. A. Fluidized bed furnace for roasting zinc concentrates as a control object. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering.* 2018;329(9):31-42. (In Russ.). <https://doi.org/10.18799/24131830/2018/9/2086>.
10. Kubaschewski O., Alcock S. B. *Metallurgical thermochemistry,* 1982. 392 p. (Russ. ed.: *Metallurgicheskaya termohimiya.* Moscow, Metallurgiya; 1982, 392 p.)
11. Sedov L. I. *Methods of similarity and dimension in mechanics.* Moscow: Nauka; 1977, 440 p. (In Russ.).
12. Pestunova N. P., Remizov Yu. S., Komkov N. M. On the mechanism of zinc concentrate roasting in fluidized bed furnaces. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya = Complex use of mineral resources.* 1990;8:55-60. (In Russ.).
13. Panshin A. M., Shakirzyanov R. M., Izbrekht P. A., Zatonskiy A. V. Basic ways of improvement of zinc pro-

duction at JSC "Chelyabinsk zinc plant". *Tsvetnye metally*. 2015;5:19-21. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.03>.

14. Boateng A. A. *Rotary kilns: transport phenomena and transport processes*. Amsterdam: Elsevier Science; 2015, 369 p.

15. Orhan G. Leaching and cementation of heavy metals from electric arc furnace dust in alkaline medium. *Hydro-metallurgy*. 2005;78(3-4):236-245. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.03.002>.

16. Krasheninina A. G., Khalezov B. D., Bornovolokov A. S., Ordinartsev D. P. Technology for extracting manganese from vanadium converter slag after leaching vanadium. *Metallurgist*. 2019;63(5):534-542. <https://doi.org/10.1134/S0036029520010073>.

17. Panshin A. M., Viduetskiy M. G., Kozlov D. A., Ivakin D. A. Using zinc cake flotation in columnar type equipment

for increasing of Waelz-process efficiency. *Tsvetnye metally*. 2015;5:59-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2015.05.12>.

18. Kozlov P. A., Kazanbaev L. A., Zatonkiy V. A., Travkin V. F. *Extraction-electrolysis processing methods of zinc raw materials*. Moscow: Ruda i metally; 2008, 269 p. (In Russ.).

19. Farkhondehkavaki M., Soleimani M., Latifi M., Berruti F., Briens C., McMillan J. Characterization of moisture distribution in a fluidized bed. *Measurement*. 2014;47(1):150-160.

<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.08.063>.

20. Molodtsova M. Yu., Dobrydnev S. V. Conditions for obtaining the main zinc carbonates from ammonium carbonate water solutions. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2013;27(7):102-105. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Алкацев Владимир Михайлович,

кандидат технических наук,
доцент кафедры металлургии цветных металлов
и автоматизации металлургических процессов,
Северо-Кавказский горно-металлургический
институт (государственный технологический
университет),
362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия

Рутковский Александр Леонидович,

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры металлургии цветных металлов
и автоматизации металлургических процессов,
Северо-Кавказский горно-металлургический
Институт (государственный технологический
университет),
362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия

Макоева Алла Константиновна,

ассистент кафедры металлургии цветных металлов
и автоматизации металлургических процессов,
Северо-Кавказский горно-металлургический
институт (государственный технологический
университет),
362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, 44, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 14.11.2022; одобрена после рецензирования 12.12.2022; принята к публикации 23.12.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir M. Alkatsev,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the
Department of Non-ferrous Metals Metallurgy
and Automation of Metallurgical Processes,
North Caucasian Mining and Metallurgical
Institute (State Technological University),
44, Nikolaev St., Vladikavkaz, 362021, Russia

Alexander L. Rutkovsky,

Dr. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Non-ferrous
Metals Metallurgy and Automation of
Metallurgical Processes,
North Caucasian Mining and Metallurgical
Institute (State Technological University),
44, Nikolaev St., Vladikavkaz, 362021, Russia

Alla K. Makoeva,

Assistant Professor of the Department of
Non-ferrous Metals Metallurgy
and Automation of Metallurgical Processes,
North Caucasian Mining and Metallurgical
Institute (State Technological University),
44, Nikolaev St., Vladikavkaz, 362021, Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 14.11.2022; approved after reviewing 12.12.2022; accepted for publication 23.12.2022.