

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЖИГА СУЛЬФИДНОЙ СВИНЦОВО-ЦИНКОВОЙ РУДЫ В АТМОСФЕРЕ ВОДЯНОГО ПАРА

И.Г. Антропова¹, П.А. Гуляшинов¹, А.А. Меринов¹

¹ Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН, Улан-Удэ, Россия,
e-mail: gulpasha@mail.ru

Аннотация: Работа посвящена разработке нового немеханического метода селективной дезинтеграции сложных минеральных комплексов, основанного на обжиге сульфидных свинцово-цинковых руд в атмосфере водяного пара. Известно, что в большинстве своем полиметаллические руды являются комплексными, характеризуются увеличением доли сложных руд с тесным взаимопрорастанием сульфидных минералов и повышенным содержанием труднообогатимых окисленных форм. Как правило, такие сульфидные руды перед флотацией вскрываются в процессе очень тонкого измельчения (до 2–50 мкм). Эффективность переработки труднообогатимых сульфидных свинцово-цинковых руд может быть достигнута предварительным их обжигом в атмосфере водяного пара на стадии подготовки данного сырья к дальнейшей флотации. Для изучения составов и физико-химических свойств исходной пробы руды и продуктов обжига использовались рентгеноспектральный микроанализ, фотонная корреляционная спектроскопия (для анализа размеров частиц) и рентгенофазовый анализ. Физико-химическое моделирование системы «основные составляющие сульфидной руды — водяной пар» проведено с использованием универсальной программы определения равновесных параметров многокомпонентных гетерогенных систем «Терра». Показано, что при обжиге сульфидной свинцово-цинковой руды в атмосфере водяного пара при 650–700 °С происходит селективное окисление пирита с образованием магнетита и сероводорода, а сульфиды свинца и цинка в составе руды остаются без изменений. Экспериментами установлено, что окисление пирита сопровождается дезинтеграцией по межфазным границам сульфидных минералов свинца и цинка. По данным анализов огарков основными продуктами обжига являются ZnS, PbS, Fe₃O₄, SiO₂ и CaCO₃, что значительно облегчит дальнейшее флотационное обогащение.

Ключевые слова: сульфидные свинцово-цинковые руды, обжиг, водяной пар, немеханическая дезинтеграция.

Для цитирования: Антропова И. Г., Гуляшинов П. А., Меринов А. А. Исследование процесса обжига сульфидной свинцово-цинковой руды в атмосфере водяного пара // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 56–67. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_56.

Roasting of lead and zinc sulfide ore in water vapor

I.G. Antropova¹, P.A. Gulyashinov¹, A.A. Merinov¹

¹ Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Ulan-Ude, Russia, e-mail: gulpasha@mail.ru

Abstract: The study intends to develop a new nonmechanical method for the selective disintegration of complex minerals based on roasting of lead and zinc sulfide ore in water vapor. Complex ores mostly feature higher contents of difficult and oxidized minerals, and close interpenetration of sulfide minerals. As a rule, such sulfide ore is subjected to dissociation by very fine grinding (to 2–50 μm) before flotation. Higher efficiency of processing of difficult lead and zinc sulfide ore is achievable through preliminary roasting of the ore in water vapor prior to flotation. The investigation of compositions and physicochemical properties of primary ore and roasting products used the X-ray spectral microanalysis, photon correlation spectroscopy (for the particle size analysis) and X-ray phase analysis. Physicochemical modeling of the sulfide ore–water vapor system components used the universal program Terra designed for determining equilibrium parameters of multi-component heterogeneous systems. The studies show that roasting of lead and zinc sulfide ore in water vapor at the temperature of 650–700 °C initiates selective oxidation of pyrite with formation of magnetite and hydrogen sulfide, while lead and zinc sulfides remain intact. The experiments find out that oxidation of pyrite goes with disintegration along the interfaces of lead and zinc. The roasted products are mainly ZnS, PbS, Fe_3O_4 , SiO_2 and CaCO_3 , which largely facilitates further flotation.

Key words: lead and zinc sulfide ore, roasting, water vapor, nonmechanical disintegration.

For citation: Antropova I. G., Gulyashinov P. A., Merinov A. A. Roasting of lead and zinc sulfide ore in water vapor. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11):56–67. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_11_0_56.

Введение

Обогащение свинцово-цинковых руд определяется их структурными особенностями, степенью окисления, соотношением сульфидных и окисленных минералов свинца, цинка и железа, характером их взаимосвязи и ассоциации с минералами породы. Для флотации сульфидных свинцово-цинковых руд используются следующие схемы: коллективная флотация с последующей селекцией коллективного концентрата, коллективно-селективная схема и последовательная селективная флотация [1–6].

Эффективное раскрытие сростков извлекаемых минералов достигается не всегда. При переработке сильножелезистых руд даже очень высокая степень их измельчения не может обеспечить удовлетворительного раскрытия сростков минералов свинца и цинка с минералами железа [2, 7–9]. Также при обогащении свинцово-цинковых руд часто сталкива-

ются с неэффективностью селективной флотации, что объясняется тонким расщеплением минералов. В этом случае минералы свинца и цинка не могут быть извлечены в виде чистых и годных к продаже концентратов. В большинстве случаев для тонковкрапленных руд содержание свинца в концентрате колеблется от 30% до 40% Pb при низком извлечении металла. Галенит находится в очень тонко рассеянной форме и сростается со сфалеритом, что затрудняет получение высокосортных концентратов цинка и приводит к необходимости использования очень тонкого измельчения и применения цианида при значительных его расходах [4].

В последнее время для переработки как традиционного сырья цветных и благородных металлов, так и различных видов отходов обогатительной и металлургической промышленности, а также вторичного сырья все больше внимание

исследователей привлекают биогидро-металлургические методы [10–13]. Однако эти процессы пока не нашли применения в условиях криолитозоны.

Водяной пар в обогащении руд цветных металлов практически не используется. В России вопросами парометаллургии занимались многие ученые. В работах [14–18] рассмотрены кинетические закономерности реакций окисления водяным паром сульфидов цветных металлов, показана возможность использования водяного пара и паровоздушной смеси в целях интенсификации процессов десульфуризации пиритсодержащего сырья, для решения проблемы утилизации пиритных концентратов с получением элементарной серы и губчатого железа. Ранее в работах авторов была показана эффективность применения водяного пара для создания атмосферы при пиросульфидировании окисленных минералов свинца и цинка, вскрытии и деарсенизации золотомышьяковистых руд с использованием в качестве сульфидизатора некондиционных пиритных концентратов [19, 20].

В настоящее время в стадии подготовки к разработке находится Озерное месторождение полиметаллических руд. Известно, что Озерное месторождение является комплексным, и основную промышленную ценность его составляют колчеданно-полиметаллические руды, содержащие цинк, свинец, серебро, кадмий и серу. Однако сульфидные руды Озерного по минеральному и фазовому составу являются неоднородными и сложными, характеризуются увеличением доли труднообогатимых руд с тонкой вкрапленностью минералов свинца, цинка, железа и повышенным содержанием взаимопроросших сульфидных минеральных форм. Как правило, такие сульфидные руды перед флотацией вскрываются в процессе очень тонкого измельчения (до 2–50 мкм).

Данная работа посвящена разработке нового немеханического метода селективной дезинтеграции сложных минеральных комплексов, основанного в обжиге труднообогатимых сульфидных свинцово-цинковых руд в атмосфере водяного пара.

Методы и материалы

Объектом исследования являлась технологическая проба сульфидной руды Озерного месторождения. Основными рудными минералами сульфидной пробы согласно рентгенофазовому анализу являются пирит FeS_2 , сфалерит ZnS и галенит PbS (в меньшем количестве). Породообразующие минералы представлены кварцем SiO_2 и кальцитом CaCO_3 . По данным химического анализа исследуемой пробы руды массовая доля Pb составила 1,16%; Zn – 6,43%; Fe – 19,73%; S – 26,72%.

Для изучения составов и физико-химических свойств исходной пробы руды и продуктов обжига использовались растровый электронный микроскоп JSM-6510LV JEOL (Япония) с системой микроанализа INCA Energy 350, Oxford Instruments (Великобритания), лазерный анализатор размеров частиц Shimadzu SALD-7500 (Япония) и рентгеновский дифрактометр D8 ADVANCE Bruker AXS (Германия) (излучение $\text{Cu}\alpha$ графитовый монохроматор). Физико-химическое моделирование системы «основные составляющие сульфидной руды – H_2O » проведено с использованием универсальной программы определения равновесных параметров многокомпонентных гетерогенных систем «Terra» и справочных термодинамических данных соответствующих соединений [21].

Результаты и обсуждение результатов

По данным РФА, основными рудными минералами сульфидной пробы

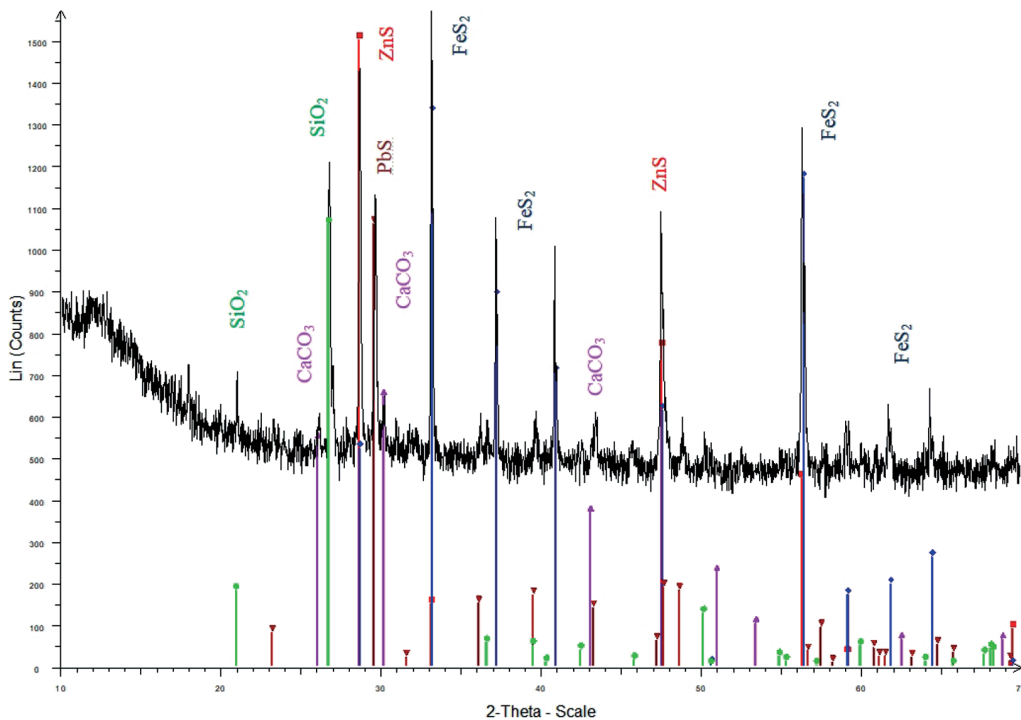


Рис. 1. Рентгенограмма сульфидной руды
 Fig. 1. X-ray diffraction pattern of sulfide ore

являются пирит FeS_2 , сфалерит ZnS и галенит PbS . Породообразующие минералы представлены кварцем SiO_2 и кальцитом CaCO_3 (рис. 1).

Физико-химическое моделирование системы «основные составляющие сульфидной руды – H_2O » проведено при различном количестве водяного пара (1,5 – 12 мл/мин) и интервале температур 200 – 800 °С.

Определен фазовый и химический состав изученной системы и его изменения в зависимости от температуры и расхода водяного пара. Согласно результатам термодинамического модели-

рования системы «руда-вода» (рис. 2, а) при расходе водяного пара 1,5 мл/мин, температуре 600 °С и выше в продуктах реакции присутствуют пирротин, неразложившийся пирит, а сульфиды свинца и цинка остаются неизменными.

Согласно рис. 2, б, кислородные минералы породы, входящие в состав руды, претерпевают некоторые изменения – в небольшом количестве образуются метасиликаты кальция и магния.

При увеличении водяного пара до 8 мл/мин количество оксида железа растёт, но в системе еще остается фаза пирротина. Практически полное пре-

Таблица 1

Исходное содержание основных компонентов в модельной системе «основные составляющие сульфидной руды-вода»
Initial content of basic components in sulfide ore-water system

Компоненты	PbS	ZnS	FeS_2	SiO_2	CaCO_3	FeCO_3	CaMgCO_3
%	1,27	8,63	39,0	32,1	14,0	3,0	2,0

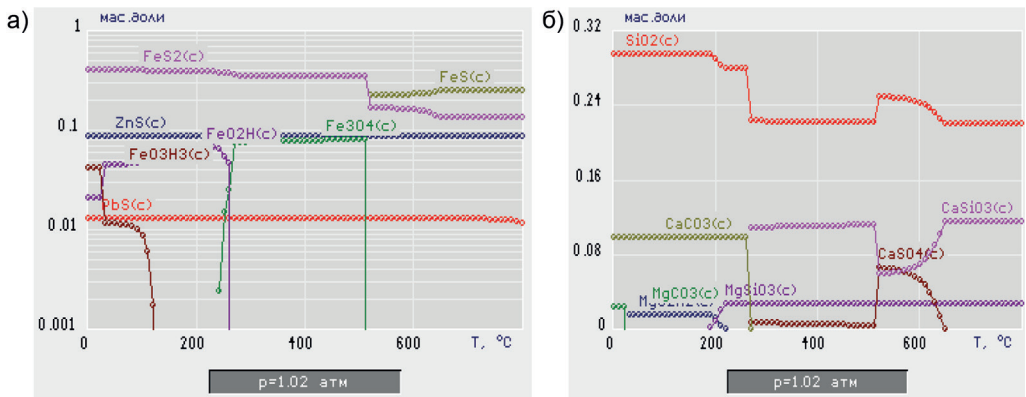


Рис. 2. Изменение фазового состава сульфидных соединений руды (а) и соединений породы (б) при расходе воды 1,5 мл/мин

Fig. 2. Change in phase composition of sulfide components of ore (a) and components of rocks (b) at water flow rate of 1.5 ml/min

вращение пирита в магнетитовую форму происходит при увеличении водяного пара до 12 мл/мин (рис. 3, а). Видно, что сульфидные соединения свинца и цинка устойчивы во всем исследуемом интервале температур и при всех расходах воды. В процессе обжига сульфидной руды с водяным паром основным продуктом газовой фазы является сероводород (рис. 3, б).

Результаты проведенного термодинамического моделирования процесса обжига сульфидной свинцово-цинковой руды указали на возможность селектив-

ного окисления пирита с образованием магнетита и выделением сероводорода.

Экспериментальные исследования по обжигу сульфидной пробы руды в атмосфере водяного пара (АВП) проводились на лабораторной установке проточного типа.

Методика эксперимента заключалась в следующем. Рабочую печь нагревали до заданной температуры, регулируемой автоматически с точностью 10 °С. Затем через рабочую зону печи пропускали водяной пар, вводили лодочку с измельченной рудой крупности –0,25 мм и мас-

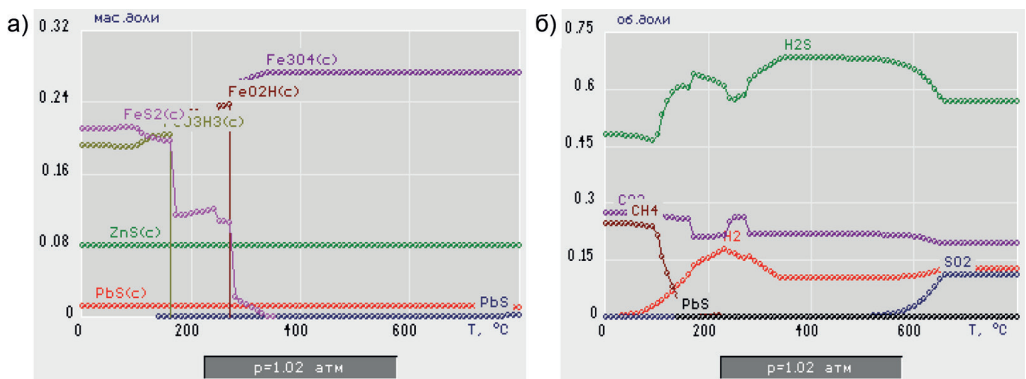


Рис. 3. Изменение фазового состава сульфидных соединений руды (а) и компонентов газовой фазы (б) при расходе воды 12 мл/мин

Fig. 3. Change in phase composition of sulfide components of ore (a) and components of gas phase (b) at water flow rate of 12 ml/min

Таблица 2

Данные рентгенофазового анализа продуктов реакции
X-ray phase analysis of products of reaction

T, °C	Обнаруженные соединения	
	1,5 мл/мин	5 мл/мин
600	ZnS, PbS, FeS ₂ , Fe _{x-1} S _x , SiO ₂ , CaCO ₃	ZnS, PbS, Fe _{x-1} S _x , FeS _{2(слева)} , SiO ₂ , CaCO ₃
650	ZnS, PbS, Fe _{x-1} S _x , SiO ₂ , CaCO ₃	ZnS, PbS, Fe ₃ O ₄ , SiO ₂ , CaCO ₃
700	ZnS, PbS, Fe _{x-1} S _x , SiO ₂ , CaCO ₃	ZnS, PbS, Fe ₃ O ₄ , SiO ₂ , CaCO ₃

сой 1 г. Продолжительность обжига составляла 30 мин.

Результаты рентгенофазового анализа продуктов реакции (табл. 2) показали, что при проведении обжига сульфидной руды в паровой атмосфере первичной стадией взаимодействия является разложение пирита. При температуре 600 °C и расходе воды 1,5 мл/мин продукты реакции представлены смесью ZnS, PbS, FeS₂, Fe_{x-1}S_x. При увеличении количества воды до 5 мл/мин и температуры до

650–700 °C конечной железосодержащей фазой является магнетит (рис. 4). Сульфиды свинца, цинка и минералы породы не претерпевают изменений.

Кроме того, обжиг пиритсодержащей руды в атмосфере водяного пара сопровождается избирательным растрескиванием минералов, в частности, пирита (рис. 5), что благоприятствует образованию оксида железа по всему объему зерна. Из-за декрипитации пирита и образования новой фазы оксида железа,

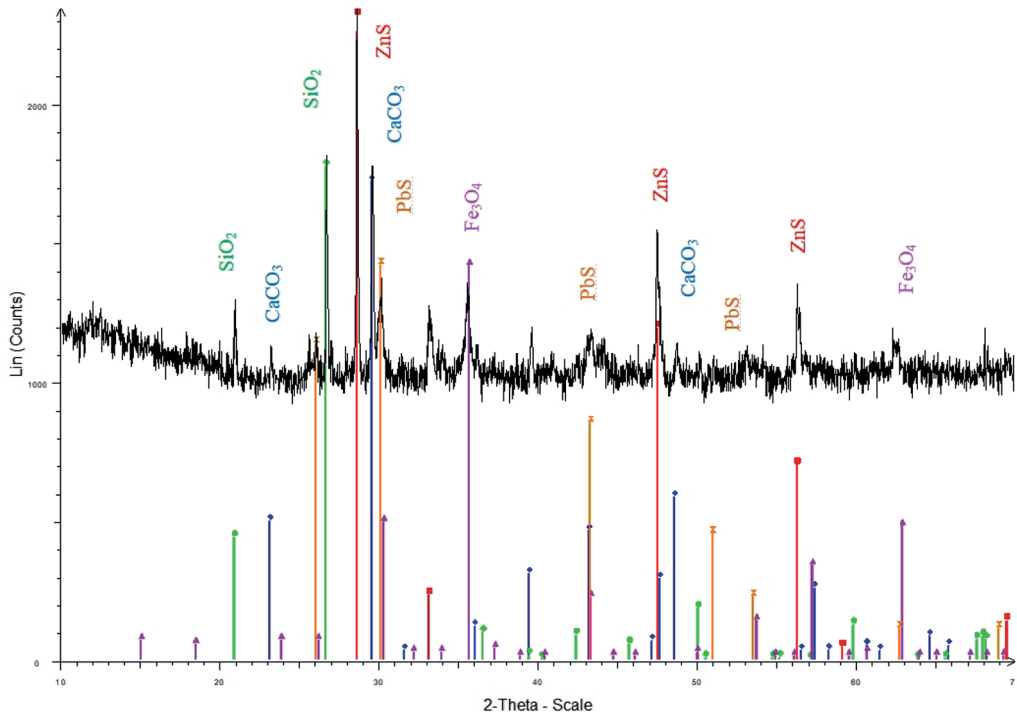


Рис. 4. Рентгенограмма огарка, обожженного в АВП при 650 °C

Fig. 4. X-ray diffraction pattern of cinder roasted in water vapor at 650 °C



Рис. 5. Декрипитация пирита при обжиге в атмосфере водяного пара

Fig. 5. Decrepitation of pyrite in roasting in water vapor

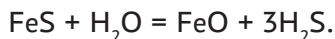
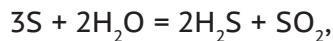
размеры железосодержащих соединений несколько увеличиваются (рис. 6).

Были определены размеры частиц исходной руды и полученных огарков. Установлено, что наряду с укрупнением железосодержащих фаз в процессе обжига происходит увеличение количества мелкой фракции, возможно, за счет высвобождения сульфидов цинка и свинца из пирита (рис. 7, 8).

Количественный анализ отходящих газов также показал, что при обжиге сульфидной свинцово-цинковой руды в атмосфере водяного пара в газовой фазе преобладает содержание сероводорода. Механизм процесса взаимодействия пи-

рита с перегретым водяным паром можно предположить следующим образом.

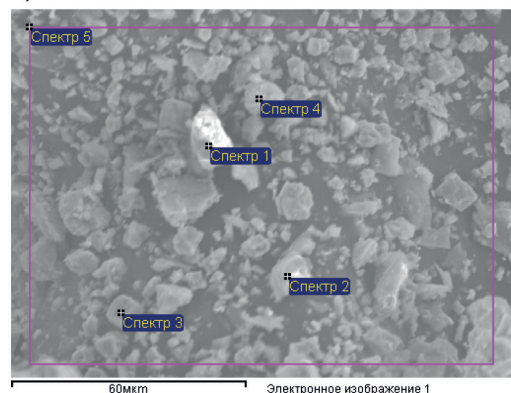
Известно, что термическая диссоциация сульфида железа сопровождается выделением S^0 по реакции $FeS_2 \rightarrow FeS + 1/2S_2$. А водяной пар выше критической температуры воды ($374,2\text{ }^\circ\text{C}$) переходит в газовое состояние и становится активным реагентом. Затем в данной системе при температурах свыше $600\text{ }^\circ\text{C}$ продукты диссоциации сульфида железа — элементарная сера и сернистое железо — взаимодействуют с перегретым водяным паром с выделением сероводорода:



Образующийся FeO неустойчив, и он легко модифицируется в магнетитовую форму Fe_3O_4 . В целом экспериментальные результаты исследования процесса обжига сульфидной руды находятся в согласии с термодинамическими расчетами.

Для удешевления и экологичности процесса обжига предлагается выделяющийся сероводород использовать для сульфидирования окисленных минералов свинца и цинка в процессе совместного обжига труднообогатимых сульфид-

а)



б)

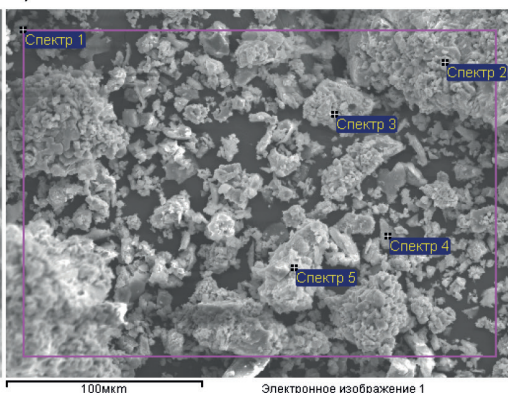


Рис. 6. Изменение морфологии сульфидной руды при обжиге в АВП: исходная руда (а); огарок (б)

Fig. 6. Morphological modification of sulfide ore in roasting in water vapor: primary ore (a); cinder (b)

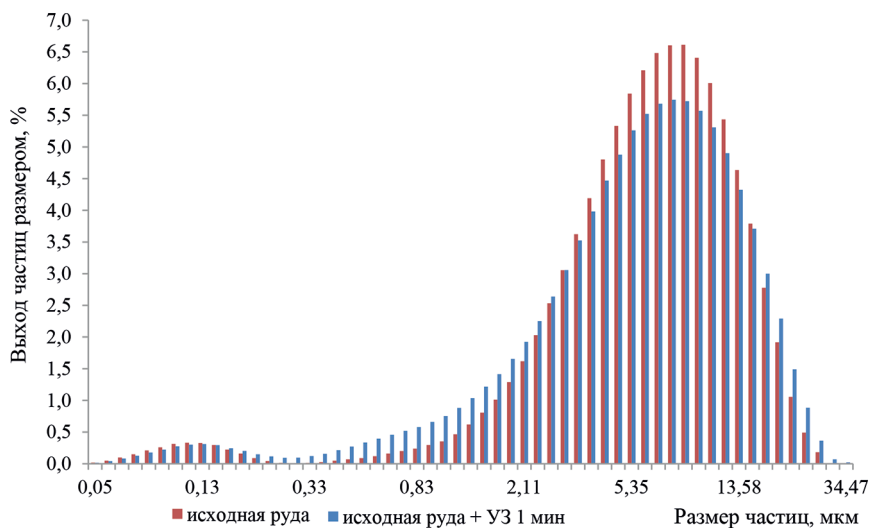


Рис. 7. Распределение размеров частиц исходной руды
 Fig. 7. Particle size distribution in primary ore

ных и окисленных руд. Пока вопросы использования окисленных и смешанных руд Озерного месторождения не нашли проектного решения. Поэтому вовлечение в переработку окисленных и смешанных свинцово-цинковых руд месторождения значительно снизит техногенную нагрузку на окружающую среду и явится дополнительным источ-

ником получения таких стратегически важных металлов, как свинец, цинк, кадмий и т.д. Также использование данного процесса при промышленном содержании благородных металлов позволит вскрыть тонкое и мелкое золото, заключенное в пирите, и попутно его извлечь при дальнейшей переработке хвостов обогащения.

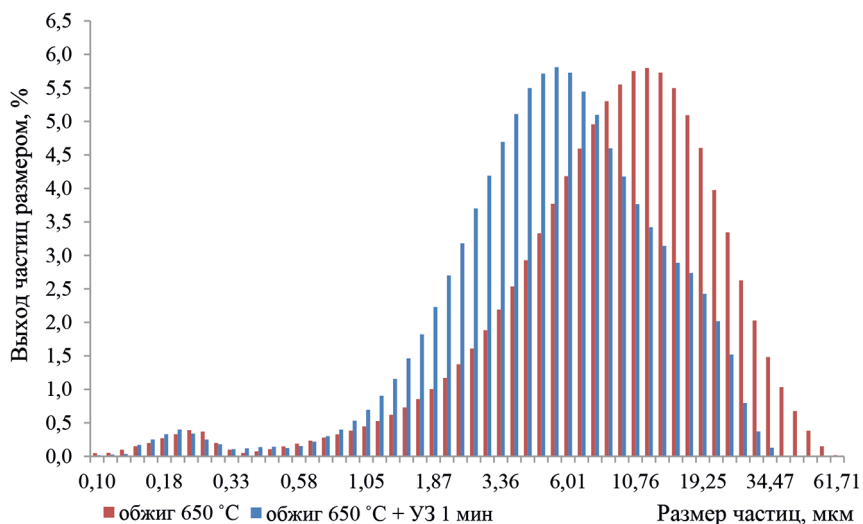


Рис. 8. Распределение размеров частиц огарка
 Fig. 8. Particle size distribution in roasted product

Заклучение

Таким образом, установлена возможность селективного окисления пирита с образованием магнетита и сероводорода в процессе обжига сульфидной свинцово-цинковой руды в атмосфере водяного пара при температуре 650 °С.

Показано, что сульфиды свинца и цинка в составе руды остаются без изменений.

По данным анализов огарков основными продуктами обжига являются ZnS, PbS, Fe₃O₄, SiO₂ и CaCO₃, это дает предполагать, что обожженный продукт может быть отнесен к легкообогатимому свинцово-цинковому сырью.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП БИП СО РАН, БГУ и ВСГУТУ (Улан-Удэ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Лапшина Г. А., Хачатрян Л. С. Развитие технологии комплексной переработки упорных пиритных полиметаллических руд цветных металлов // Цветные металлы. — 2018. — № 4. — С. 27–34. DOI: 10.17580/tsm.2018.04.03.
2. Чантурия В. А., Бочаров В. А. Современное состояние и основные направления развития технологии комплексной переработки минерального сырья цветных металлов // Цветные металлы. — 2016. — № 11. — С. 11–18. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.01.
3. Шумская Е. Н., Поперечникова О. Ю., Купцова А. В. Особенности технологии переработки полиметаллических руд // Горный журнал. — 2016. — № 11. — С. 39–48. DOI: 10.17580/gzh.2016.11.08.
4. Смайлов Б. Б. Разработка способа оценки обогатимости и моделирования флотационных систем переработки труднообогатимых свинцово-цинковых руд: диссертация ... канд. техн. наук, специальность 25.00.13. — М.: ИПКОН РАН, 2019. — 182 с.
5. Zhihao Shen, Shuming Wen, Guang Han, Yaowen Zhou, Xu Bai, Qicheng Feng Selective depression mechanism of locust bean gum in the flotation separation of chalcopyrite from pyrite in a low-alkalinity media // Minerals Engineering. 2021, vol. 170, article 107044. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107044.
6. Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Бочкарев Г. Р., Пушкарева Г. И., Коваленко К. А. Научное обоснование и разработка инновационных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 5. — С. 187–202. DOI: 10.1134/S1062739114050160.
7. Ozun Savas, Vaziri Hassas Behzad, Miller J. D. Collectorless flotation of oxidized pyrite // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2019, vol. 561, pp. 349–356. DOI:10.1016/j.colsurfa.2018.10.064.
8. Чантурия В. А., Козлов А. П. Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья // Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья (Плаксинские чтения–2017). — Красноярск, 2017. — С. 2–6.
9. Fengnian Shi, Weiguo Xie Specific energy-based ball mill model: From batch grinding to continuous operation // Minerals Engineering. 2016, vol. 86, pp. 66–74. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.12.004.
10. Алборов И. Д., Гегуева М. М., Касумов Ю. Н., Козырев Е. Н., Созаев В. А. Биоготехнология золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 6. — С. 126–133. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-126-133.
11. Прокопьев И. В. Разработка флотационной схемы обогащения свинцово-цинковой руды с использованием микробиологического воздействия: диссертация ... канд. техн. наук: специальность 25.00.13. — Красноярск: СФУ, 2019. — 121 с.

12. Ye M., Li G., Yan P., Ren J., Zheng L., Han D., Sun S., Huang S., Zhong Y. Removal of metals from lead-zinc mine tailings using bioleaching and followed by sulfide precipitation // *Chemosphere*. 2017, vol. 185, pp. 1189–1196. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.07.124.

13. Фомченко Н. В., Муравьев М. И. Биовыщелачивание сульфидных концентратов с различным содержанием меди и цинка и оценка качества получаемых осадков // *Прикладная биохимия и микробиология*. – 2020. – Т. 56. – № 4. – С. 366–372. DOI: 10.31857/S0555109920040054.

14. Востриков В. А., Вострикова Н. М. Термодинамический анализ возможных превращений в системе сульфид металла – водяной пар // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 2005. – № 6. – С. 8–13.

15. Лобанов В. Г., Кузас Е. А., Мельников А. В., Прокудина Е. В., Каратаева А. В., Викулов В. И., Набиуллин Ф. М., Начаров В. Б., Филонов Н. А., Русских А. А. Патент № 2479650. РФ, МПК С22В 11/00 (2006.01), С22В 1/02 (2006.01), С22В 3/04 (2006.01). Способ извлечения благородных металлов из руд и концентратов: № 2012105165/02: заявл. 14.02.2012 : опубл. 20.04.2013. – 7 с.


16. Акопян К. Е., Карамян Г. Г., Акопян А. Л. Новая технология комплексной переработки пиритного концентрата // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. – 2018. – № 31-36. – С. 62–70. DOI: 10.15518/isjaee.2018.31-36.062-070.

17. Федяева О. Н., Востриков А. А. Превращения пирита и пирротина в сверхкритической воде // *Сверхкритические флюиды. Теория и практика*. – 2016. – Т. 11. – № 2. – С. 8–13.

18. Никифоров К. А., Гуляшинов А. Н. Кооперативные процессы в паровой технологии пиритных концентратов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 1994. – № 5. – С. 116–118.

19. Гуляшинов П. А., Палеев П. Л., Гуляшинов А. Н. Термодинамическое моделирование процесса деарсенизации труднообогатимой золото-кварц-мышьяковистой (скородитовой) руды в атмосфере водяного пара // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2016. – № 2. – С. 155–160. DOI: 10.1134/S1062739116020526.

20. Антропова И. Г., Дамбаева А. Ю., Данжеева Т. Ж. Применение сульфидизирующего обжига в атмосфере водяного пара в схемах обогащения окисленных свинецсодержащих руд // *Обогащение руд*. – 2016. – № 6. – С. 3–8. DOI: 10.17580/or.2016.06.01.

21. *Binnewies M., Mike E. Thermochemical data of elements and compounds*. 2002, 928 p. 

REFERENCES

1. Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Lapshina G. A., Khachatryan L. S. Development of the technology of complex processing of resistant pyrite polymetallic ores of non-ferrous metals. *Tsvetnye Metally*. 2018, no. 4, pp. 27–34. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2018.04.03.

2. Chanturia V. A., Bocharov V. A. The current state and main directions of development of the technology of complex processing of mineral raw materials of non-ferrous metals. *Tsvetnye Metally*. 2016, no. 11, pp. 11–18. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2016.11.01.

3. Shumskaya E. N., Pererechnikov O. Yu., Kuptsova A. V. Features of the technology of processing polymetallic ores. *Gornyi Zhurnal*. 2016, no. 11, pp. 39–48. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2016.11.08.

4. Smaylov B. B. *Razrabotka sposoba otsenki obogatimosti i modelirovaniya flotatsionnykh sistem pererabotki trudnoobogatimyykh svintsovo-tsinkovykh rud* [Development of a method for assessing the enrichment capacity and modeling flotation systems for processing difficult-to-enrich lead-zinc ores], Candidate's thesis, Moscow, IPKON RAN, 2019, 182 p.

5. Zhihao Shen, Shuming Wen, Guang Han, Yaowen Zhou, Xu Bai, Qicheng Feng Selective depression mechanism of locust bean gum in the flotation separation of chalcopyrite from pyrite in a low-alkalinity media. *Minerals Engineering*. 2021, vol. 170, article 107044. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107044.

6. Kondratyev S. A., Rostovtsev V. I., Bochkarev G. R., Pushkareva G. I., Kovalenko K. A. Scientific substantiation and development of innovative technologies for complex processing of difficult-to-enrich ores and technogenic raw materials. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2014, no. 5, pp. 187–202. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1062739114050160.

7. Ozun Savas, Vaziri Hassas Behzad, Miller J. D. Collectorless flotation of oxidized pyrite. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019, vol. 561, pp. 349–356. DOI:10.1016/j.colsurfa.2018.10.064.

8. Chanturia V. A., Kozlov A. P. Modern problems of complex processing of difficult-to-enrich ores and technogenic raw materials. *Sovremennyye problemy kompleksnoy pererabotki trudnoobogatimyykh rud i tekhnogennogo syr'ya (Plaksinskie chteniya–2017)* [Modern problems of complex processing of difficult-to-enrich ores and technogenic raw materials (Plaksin readings-2017)], Krasnoyarsk, 2017, pp. 2–6. [In Russ].

9. Fengnian Shi, Weiguo Xie Specific energy-based ball mill model: From batch grinding to continuous operation. *Minerals Engineering*. 2016, vol. 86, pp. 66–74. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.12.004.

10. Alborov I. D., Gegueva M. M., Kasumov Yu.N., Kozyrev E. N., Sozaev V. A. Bio-geo-technology for gold-bearing ore. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 6, pp. 126–133. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-6-0-126-133.

11. Prokopyev I. V. *Razrabotka flotatsionnoy skhemy obogashcheniya svintsovo-tsinkovoy rudy s ispol'zovaniem mikrobiologicheskogo vozdeystviya* [Development of a flotation scheme for the enrichment of lead-zinc ore using microbiological exposure], Candidate's thesis, Krasnoyarsk, SFU, 2019, 121 p.

12. Ye M., Li G., Yan P., Ren J., Zheng L., Han D., Sun S., Huang S., Zhong Y. Removal of metals from lead-zinc mine tailings using bioleaching and followed by sulfide precipitation. *Chemosphere*. 2017, vol. 185, pp. 1189–1196. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2017.07.124.

13. Fomchenko N. V., Muravyev M. I. Bio-leaching of sulfide concentrates with different copper and zinc contents and assessment of the quality of the obtained precipitation. *Applied biochemistry and microbiology*. 2020, vol. 56, no. 4, pp. 366–372. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0555109920040054.

14. Vostrikov V. A., Vostrikova N. M. Thermodynamic analysis of possible transformations in the metal sulfide-water vapor system. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya*. 2005, no. 6, pp. 8–13. [In Russ].

15. Lobanov V. G., Kuzas E. A., Mel'nikov A. V., Prokudina E. V., Karataeva A. V., Vikulov V. I., Nabiullin F. M., Nacharov V. B., Filonov N. A., Russkikh A. A. *Patent RU 2479650. MPK C22B 11/00 (2006.01), C22B 1/02 (2006.01), C22B 3/04 (2006.01)*. 20.04.2013. [In Russ]

16. Akopyan K. E., Karamyan G. G., Akopyan A. L. New technology of complex processing of pyrite concentrate. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2018, no. 31-36, pp. 62–70. [In Russ]. DOI: 10.15518/isjaee.2018.31-36.062-070.

17. Fedyaeva O. N., Vostrikov A. A. Transformations of pyrite and pyrrhotite in supercritical water. *Supercritical fluids. Theory and practice*. 2016, vol. 11, no. 2, pp. 8–13. [In Russ].

18. Nikiforov K. A., Gulyashinov A. N. Cooperative processes in the steam technology of pyrite concentrates. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 1994, no. 5, pp. 116–118. [In Russ].

19. Gulyashinov P. A., Paleev P. L., Gulyashinov A. N. Thermodynamic modeling of the process of dearsenization of hard-to-enrich gold-quartz-arsenic (skorodite) ore in a water vapor atmosphere. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2016, no. 2, pp. 155–160. [In Russ]. DOI: 10.1134/S1062739116020526.

20. Antropova I. G., Dambaeva A. Yu., Danzheeva T. Zh. Application of sulfidizing roasting in the atmosphere of water vapor in the schemes of enrichment of oxidized lead-containing ores. *Obogashchenie Rud*. 2016, no. 6, pp. 3–8. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2016.06.01.

21. Binnewies M., Mike E. *Thermochemical data of elements and compounds*. 2002, 928 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Антропова Инна Германовна*¹ — канд. техн. наук,
зав. лабораторией, e-mail: inan@binm.ru,
*Гуляшинов Павел Анатольевич*¹ — канд. техн. наук,
научный сотрудник, e-mail: gulpasha@mail.ru,
*Меринов Артем Андреевич*¹ — инженер,
e-mail: artemerinov@yandex.ru,

¹ Байкальский институт природопользования Сибирского отделения РАН.

Для контактов: Гуляшинов П.А., e-mail: gulpasha@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*I.G. Antrova*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Head of Laboratory, e-mail: inan@binm.ru,
*P.A. Gulyashinov*¹, Cand. Sci. (Eng.),
Researcher, e-mail: gulpasha@mail.ru,
*A.A. Merinov*¹, Engineer, e-mail: artemerinov@yandex.ru,

¹ Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch
of Russian Academy of Sciences, 670047, Ulan-Ude, Russia.

Corresponding author: P.A. Gulyashinov, e-mail: gulpasha@mail.ru.

Получена редакцией 27.07.2021; получена после рецензии 04.08.2021; принята к печати 10.10.2021.

Received by the editors 27.07.2021; received after the review 04.08.2021; accepted for printing 10.10.2021.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЕЧНЫХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ БУРЕНИЯ НАКЛОННЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН (2021, № 8, СБ 13, 28 с.)

*Дмитрак Юрий Витальевич*¹ — д-р техн. наук, профессор, e-mail: dmitrak@yandex.ru,
Анищенко Василий Иванович,

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт
(государственный технологический университет).

Проведено сравнение основных технических характеристик различных производителей гироскопических навигационных систем для бурения горизонтальных направленных скважин и анализ принципов их работы. Раскрыты результаты расчетов и последующих практических испытаний уплотнений и подшипников вала 25-тонного станка для бурения наклонных направленных скважин для добычи рудных полезных ископаемых, даны рекомендации для выбора конструкции привода на вращение бурового станка с наклонной мачтой.

SOME RESEARCH ISSUES OF RACK-AND-PINION DRILLING RIGS FOR DRILLING INCLINED AND HORIZONTAL WELLS

*Yu. V. Dmitrak*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: dmitrak@yandex.ru, *V. I. Anishenko*¹,
¹ North Caucasian Institute of mining and metallurgy (State Technological University),
Vladikavkaz, Russia.

The main technical characteristics of various manufacturers of gyroscopic navigation systems for drilling horizontal directional wells are compared and the principles of their operation are analyzed. The results of calculations and subsequent practical tests of seals and shaft bearings of a 25-ton machine for drilling inclined directional wells for mining ore minerals are disclosed, recommendations are given for choosing a drive design for rotating a drilling rig with an inclined mast.