

Abstract

Mutual loss and inter-contamination of concentrates with different metals is one of the crucial difficulties in beneficiation of nonferrous metal ores. Moreover, the presence of an unwanted metal can result in considerable reduction in cost of the concentrates and, sometimes, in complete discard of the concentrates for there are chemical constraints that make impossible further hydro- or pyro-processing of the concentrates.

This difficulty is the feature of copper–molybdenum ore, particularly, concerning copper content of molybdenum concentrates. Hydrometallurgical processes are imposed with rigid constraints in terms of copper content of a marketable concentrate. As molybdenum concentrate reaches merchantability standards only after a few releaning stages (5–7), it is highly important to manage and control these selective operating stages.

The article describes an approach of including mechanical activation of bulk concentrate in the process circuit. Mechanical activation enables moderate, as against grinding, preparation of mineral surface for selective treatment with depressing agents towards perfectly higher efficiency of copper mineral deposition.

Keywords: copper-molybdenum ore, flotation, selection, mechanical activation.

References

1. Bocharov V. A., Ignatkina V. A. Mineral concentration technology : in two volumes. Moscow : "Ore and Metals" Publishing House, 2007. 472 p.
2. Abramov A. A. Theoretical basis of intensification of technological processes of flotation. *Tsvetnye Metall.* 2013. No. 2. pp. 17–21; No. 3. pp. 11–15; No. 4. pp. 12–17.

3. Karnaukhov S. N., Plyasovitsa S. S., Vilkova N. V. Technology of processing of molybdenium-bearing ores. *Tsvetnye Metall.* 2011. No. 8/9. pp. 55–61.
4. Shuhua Dua, Zhenfu Luo. Flotation technology of refractory low-grade molybdenum ore. *International Journal of Mining Science and Technology.* 2013. Vol. 23, Iss. 2. pp. 255–260.
5. Abramov A. A. Collection of proceedings. Volume 7 : Flotation. Collecting agents. Moscow : Gornaya kniga, 2012. 656 p.
6. Sorokin M. M. Flotation methods of concentration. Chemical basis of flotation. Moscow : MISIS, 2011. 411 p.
7. Nakhael F., Irannajad M. Investigation of effective parameters for molybdenite recovery from porphyry copper ores in industrial flotation circuit. *Physicochemical Problems of Mineral Processing.* 2014. Vol. 50(2), pp. 477–491.
8. Sataev I. Sh., Baranov V. F. About the global practice of concentration of copper-porphyric ores (review). *Obogashchenie Rud.* 2011. No. 4. p. 45.
9. Guang-yi Liu, Yi-ping Lu, Hong Zhong, Zhan-fang Cao, Zheng-he Xu. A novel approach for preferential flotation recovery of molybdenite from a porphyry copper–molybdenum ore. *Minerals Engineering.* 2012. Vol. 36–38. pp. 37–44.
10. Vazifeh Y., Jorjani E., Bagherian A. Optimization of reagent dosages for copper flotation using statistical technique. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China.* 2010. Vol. 20, Iss. 12. pp. 2371–2378.
11. Asonchik K. M., Belova V. P. Improvement of scheme of processing of copper-molybdenum ore at Agarak plant. *Obogashchenie Rud.* 2010. No. 1. pp. 20–21.
12. Arustamyan A. M., Arustamyan K. M. Improvement of technology of concentration of copper-molybdenum ores of Kadzharan deposit. *Gornyi Zhurnal.* 2010. Special issue. pp. 44–47.

УДК 622.7

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ РУД

Е. Н. ШУМСКАЯ¹, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук, rivs@rivs.ru
О. Ю. ПОПЕРЕЧНИКОВА¹, заведующая сектором
А. В. КУПЦОВА¹, минералог

¹ СП ЗАО «ИВС», Санкт-Петербург, Россия

Введение

Полиметаллические руды отличаются большим разнообразием по стадиям и условиям минералообразования, соотношению главных рудных и породообразующих минералов, форме рудных тел, текстурно-структурным особенностям [1].

Руды могут относиться к разному генетическому типу, но некоторые особенности вещественного состава руд определяют их технологические свойства:

- вкрапленность и крупность сульфидных минералов, степень взаимного прорастания их между собой;
- соотношение извлекаемых и неизвлекаемых минеральных форм;
- неблагоприятное для селективного разделения соотношение минералов Cu:Pb:Zn:Py;
- присутствие глинисто-слюдистых минералов;
- наличие химически активных гидрофильных пород, интенсивно поглощающих собиратель (пироксены, углесодержащие карбонаты, тальк, серицит и др.);
- наличие в руде минералов, способствующих образованию в пульпе ионов тяжелых металлов;

Комплексный минералогический анализ полиметаллических руд позволил определить основные технологические параметры их переработки: стадильность и циклы извлечения минералов, применение селективных реагентов, анализ жидкой фазы минеральной пульпы в процессах измельчения и флотации, использование технологической машины Zimar для пульпоподготовки. На основании большого числа лабораторных исследований разработана технология переработки полиметаллических руд, которая позволяет обеспечивать высокую селективность разделения свинцовых, медных и цинковых минералов независимо от вещественного состава руд и не оказывает негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: полиметаллические руды, селекция медно-свинцового концентрата, флотационные реагенты.

DOI: [dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.08](https://doi.org/10.17580/gzh.2016.11.08)

- кислотно-щелочные свойства горных пород, способные изменять pH пульпы.

Результаты исследований флотиремости минералов меди, свинца и цинка из полиметаллических руд

В статье приведены результаты исследований флотиремости минералов меди, свинца и цинка из крупновкрапленной бедной по меди шихты, состоящей из руд гидротермальных месторождений Джурково и Дружба, перерабатываемых на Лакинской обогатительной фабрике (Республика Болгария) и тонковкраплен-

Таблица 1. Минеральный состав исходных проб руд, % (масс.)

Минералы	Шихта руд месторождений Джурково и Дружба (60:40)	Руда месторождения Корбалихинское
<i>Породообразующие минералы</i>		
Кварц	41,8	17,4
Силикаты	42,9	24,0
Карбонаты (кальцит)	6,1	25,5
<i>Сульфидные минералы</i>		
Галенит	3,0	2,8
Сфалерит	2,9	9,65
Халькопирит	0,4	2,45
Пирит	2,7	17,5
Вторичные минералы Cu (ковеллин, халькозин)	Ед. зн.	0,15
Другие минералы	0,2	0,5
Итого	100	100

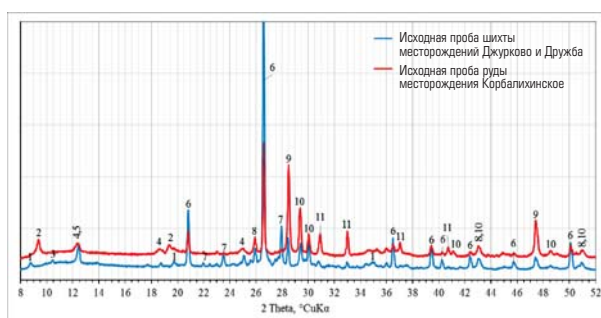


Рис. 1. Сравнительные дифрактограммы исходных проб руд с обозначением основных минеральных фаз:

- 1 — слюда; 2 — тальк; 3 — амфиболы (тремолит); 4 — хлорит; 5 — каолинит; 6 — кварц; 7 — полевые шпаты (ортоклаз, альбит); 8 — галенит; 9 — сфалерит; 10 — карбонаты (кальцит, доломит); 11 — пирит

ной колчеданной полиметаллической руды месторождения Корбалихинское (табл. 1).

Комплексный минералогический анализ проб полиметаллических руд показал существенное отличие их вещественного состава и неблагоприятное соотношение сульфидных минералов для их селекции. Руды месторождений Джурково и Дружба сложены в основном породообразующими минералами. На долю сульфидных минералов приходится всего 9 %, из которых преобладают галенит (3 %) и сфалерит (2,9 %) [2], а в руде месторождения Корбалихинское содержится более 30 % сульфидных минералов, из которых преобладают пирит (17,5 %) и сфалерит (9,65 %), на долю породообразующих минералов приходится 70 %.

В пробе шихты руд месторождений Джурково и Дружба основными нерудными минералами являются силикаты (42,9 %),

представленные в основном кварцем (41,8 %) и полевыми шпатами, в то время как в пробе руды месторождения Корбалихинское на долю кварца приходится лишь 17,4 %, а большую часть пробы составляют карбонатные минералы (25,5 %) и магнезиальные силикаты (24 %). Эти различия хорошо видны на дифрактограммах исходных проб (рис. 1): интенсивность основного пика кварца (фаза 6) в исходной пробе шихты месторождений Джурково и Дружба намного превышает аналогичный в исходной руде Корбалихинского месторождения. Для пробы шихты руд месторождений Джурково и Дружба характерны пики, принадлежащие полевым шпатам (ортоклаз, альбит, фаза 7), в то время как в пробе руды месторождения Корбалихинское отмечается явное присутствие талька (фаза 2). Фазовый анализ полезных компонентов показал, что медь, цинк, свинец в обоих пробах представлен в основном в форме первичных сульфидов — халькопирита, сфалерита и галенита соответственно (табл. 2).

Характер выделения сульфидных минералов, в особенности их крупность и морфология, для этих руд также различен (рис. 2). Шихта руд месторождений Джурково и Дружба — крупновкрапленная; размер зерен основных сульфидов (галенита и сфалерита) может достигать 1–2 см, халькопирита — до 0,5 см, пирита — до 5 см, пирита — до 5 см. Руда месторождения Корбалихинское весьма тонкозернистая со сложным взаимопроращением зерен минералов [3]. Этот факт обуславливает различную степень измельчения для эффективного разделения минералов, которое, в свою очередь, непосредственно связано с раскрытием сульфидов.

При тонине помола руды месторождения Корбалихинское до крупности 97,2 % класса –74 мкм массовая доля свободных зерен галенита и сфалерита на 10–15 % (отн.) меньше, чем в шихте руд месторождений Джурково и Дружба, измельченной до крупности 60 % класса –74 мкм, а раскрытие халькопирита и пирита близкое (табл. 3). При этом доля свободных зерен этих минералов в труднофлотируемом классе крупности –10+0 мкм (рис. 3) выше в руде месторождения Корбалихинское.

Недостаточное раскрытие сфалерита при измельчении руд выражается в широком распространении структуры распада твердого раствора халькопирита с субмикроскопическими размерами в сфалерите. Подобные признаки руд вышеуказанных месторождений осложняют получение высококачественных концентратов в процессе селекции вследствие неизбежных потерь части ценных компонентов (например, меди из-за остающихся в сфалеритах эмульсионных выделений халькопирита). По данным минералогического анализа в рудах этих месторождений примерно 17 % меди находится в эмульсионной вкрапленности в сфалерите.

Схемы переработки руд

Выбор рациональной схемы переработки полиметаллических руд имеет важное значение и, как правило, способствует повышению технологических показателей. Достигнуть этого можно разными путями, но ее структура тесно связана с характером вкрапленности сульфидных минералов и кинетикой их естественной флотуемости сульфидрильными собирателями. Без подачи де-

Таблица 2. Фазовый состав исходных проб руд

Компонент	Шихта руд месторождений Джурково и Дружба		Руды месторождения Корбалихинское	
	Массовая доля, %			
	абс.	отн.	абс.	отн.
Си окисленная	0,007	4,5	0,04	4,3
Си вторичная	0,014	9,3	0,06	6,5
Си первичная	0,129	86,2	0,82	89,2
Си общая	0,150	100,0	0,92	100,0
Zn окисленный	0,21	11,5	0,04	0,7
Zn сульфидный	1,64	88,5	6,11	99,3
Zn общий	1,85	100,0	6,15	100,0
Pb окисленный	0,17	6,5	0,02	0,6
Pb сульфидный	2,42	91,8	2,44	93,0
Плюмбозинт	0,04	1,7	0,16	6,4
Pb общий	2,63	100,0	2,62	100,0
Fe общее	4,37		9,25	
S общая	2,82		14,2	

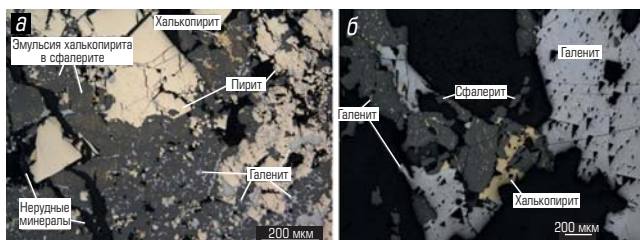


Рис. 2. Характер срастания сульфидных минералов: а — месторождение Корбалихинское; б — месторождение Джурково

прессора при pH = 8÷9,5 медные минералы флотируются несколько быстрее свинцовых. При применении цианида в сочетании с цинковым купоросом флотация халькопирита начинает существенно отставать от флотации галенита. Наличие вторичных минералов меди осложняет процесс селекции из-за растворения их в цианиде. Сульфокситные методы депрессии сфалерита и пирита, наоборот, способствуют более быстрой флотации медных минералов и несколько замедляют флотацию галенита [4, 5].

Руды месторождений Джурково и Дружба в настоящее время перерабатываются в смеси на Лакинской обогатительной фабрике, входящей в состав Холдинга КЦМ-2000 Групп, по цианидной технологии с получением свинцового и цинкового концентратов.

В 2014 г. специалистами СП ЗАО «ИВС» была разработана бесцианидная технология, позволяющая извлекать из шихты руд медные минералы при конечной тонине помола руды 60 % класса –74 мкм. Из-за неблагоприятного соотношения свинцовых и цинковых минералов (1:1) была предложена коллективно-селективная схема (рис. 4), которая предусматривает выделение медно-свинцовой «головки», содержащей 67,6 % свинца, 3,21 %

Таблица 3. Раскрытие сульфидных минералов для их селективного разделения в исходных пробах

Минерал	Содержание, % (абс/отн.), в рудах месторождений	
	Джурково и Дружба	Корбалихинское
Галенит	3/100	2,82/100
Свободные зерна	2,6/86,9	2/69,2
Сфалерит	2,9/100	9,65/100
Свободные зерна	1,8/60,8	4,2/43,6
Халькопирит	0,4/100	2,45/100
Свободные зерна	0,3/74,2	1,8/73,8
Пирит	2,7/100	17,5/100
Свободные зерна	2,2/82,5	15,1/86

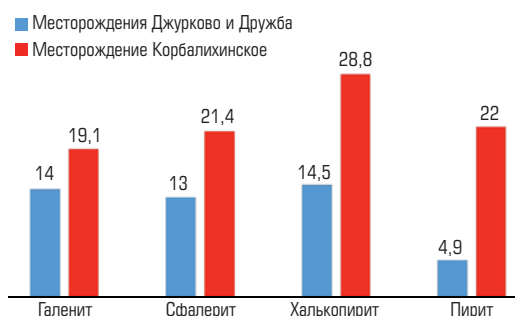


Рис. 3. Содержание свободных труднофлотируемых зерен сульфидных минералов крупностью менее 10 мкм, % (отн.)

меди и 1,97 % цинка, с извлечением 55,73 % меди и 71,49 % свинца, что значительно упрощает дальнейшую селекцию свинцовых и цинковых минералов в последующих операциях медно-свинцового цикла флотации.

Руду месторождения Корбалихинское, которую планируется перерабатывать на Рубцовской обогатительной фабрике после ее реконструкции, исследовали на обогатимость различные организации. В 2013 г. специалистами СП ЗАО «ИВС» была разработана технология [6], обеспечивающая наиболее полное извлечение минералов меди, свинца и цинка по селективно-коллективно-селективной схеме, когда часть медных минералов извлекается в медную «головку», хвосты которой направляются в операции медно-свинцовой флотации (рис. 5). Целесообразность операции флотации медной «головки» в данном случае обусловлена тем, что в нее извлекаются вторичные минералы меди, которые затрудняют разделение медно-свинцового концентрата по бесцианидной технологии; руда имеет неблагоприятное соотношение медных и свинцовых минералов (1:1), что негативно сказывается на их селекции (после того, как в медную «головку» извлекается до 35 % меди, в питании операции разделения галенит становится преобладающим минералом).

Неравномерная вкрапленность минералов предопределила стадийное извлечение медных и свинцовых минералов при тонком помоле руды после трех стадий измельчения. Грубые пром-

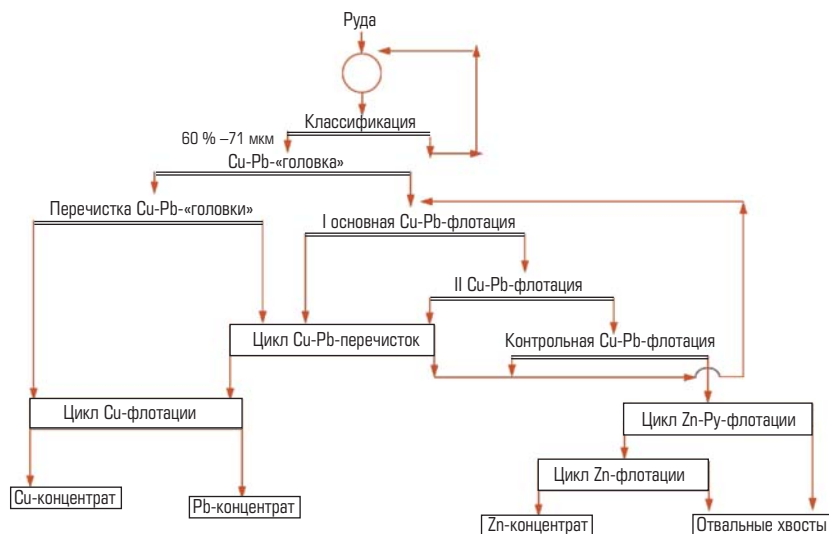


Рис. 4. Принципиальная схема обогащения шихты руд месторождений Джурково и Дружба (60:40)

продукты после специальной операции пульпоподготовки разделяли на медно-свинцовые и цинк-пиритные в отдельном цикле.

Для извлечения цинковых минералов для обеих руд рекомендована цинк-пиритная флотация, целью которой является сбросить основную часть пустой породы в отвал и сконцентрировать цинк-содержащие минералы. Концентрат цинк-пиритной флотации направляется на цинковую флотацию с получением кондиционного концентрата и вторых отвальных хвостов.

Реагентный режим, выбранный для флотации этих руд, несмотря на разницу их вещественного состава, принципиальных различий не имеет. В качестве депрессора сфалерита в основных операциях медно-свинцовой флотации используют сочетание сульфидов

да натрия и цинкового купороса в соотношении 1:2, сульфита (Na_2SO_3) или пиросульфита натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) при $\text{pH}=8,2\div 8,5$, создаваемой известью, которая подается в измельчение.

Для обогащения руды месторождения Корбалихинское разработана технология, позволяющая исключить применение цианида в основных операциях медно-свинцового цикла с использованием оборотной воды, при этом в циклах перечисток и в операциях флотации промежуточных продуктов медно-свинцового цикла применяется цианид и свежая техническая вода. При переработке шихты руд месторождений Джурково и Дружба цианид из процесса был исключен полностью.

Отличительной особенностью реагентного режима является то, что в каждом цикле флотации применяется свой селективный собиратель: в медно-свинцовом цикле Aerophine 3418A самостоятельно или в сочетании с бутиловым ксантогенатом, в медном Aero-9863, в цинковом MX-525 или аэрофлот. В качестве вспенивателя во всех циклах использовался МИБК. Применение операций оттирок позволило в сочетании с реагентным режимом достичь высокой селективности процесса в цикле перечисток медно-свинцового концентрата и в цинковом цикле флотации.

Связь реагентного режима и ионного состава пульпы Cu-Pb-цикла флотации

Большинство растворимых в воде веществ оказывают сильное влияние на показатели сульфидной флотации. В жидкой фазе флотационной пульпы всегда присутствуют ионы тяжелых металлов, которые могут быть нежелательными для флотации одних минералов и оказывать активирующее действие на другие. На

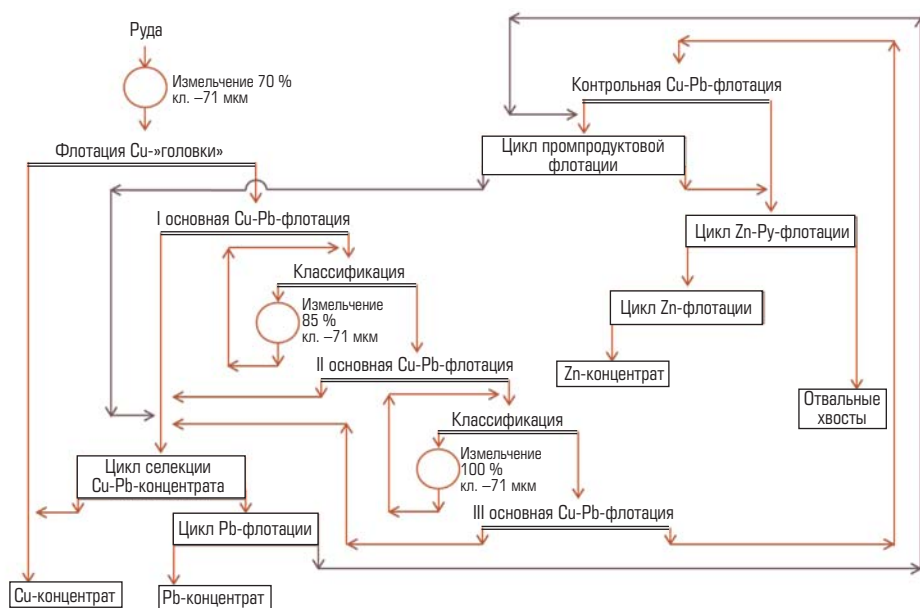


Рис. 5. Принципиальная схема обогащения руды месторождения Корбалихинское

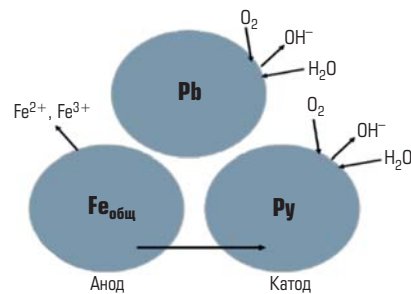


Рис. 6. Схематическое изображение гальванических реакций между минералами и мелющими телами во время измельчения

Таблица 4. Ионный состав продуктов измельчения и флотации при переработке полиметаллических руд, мг/л

Ионный состав	Корбалихинское месторождение			Шихта руд месторождений Дружково и Дружба			
	Водная вытяжка из руды	Техническая (природная) вода	Оборотная вода, сульфитно-цианидная новая технология	Водная вытяжка из руды	Техническая (природная) вода	Оборотная вода, бесцианидная новая технология	Оборотная вода, цианидная существующая технология
Cu ²⁺	0,006	<0,001	<0,001	0,041	0,008	0,009	6
Pb ²⁺	0,058	0,013	8	0,057	0,004	0,37	0,14
Zn ²⁺	0,044	0,024	1,5	0,62	0,04	0,1	0,14
Ca ²⁺	15,2	63,3	428	31,1	86,5	86	73,5
Mg ²⁺	5,8	25,7	0,14	2,6	8,4	0,05	2,3
Mn ²⁺	0,042	<0,005	<0,005	0,21	0,001	0,005	0,18
Fe ²⁺	<0,1	<0,1	0,14	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Fe ³⁺	1,8	0,07	0,21	0,11	6	0,05	40
K ⁺	0,91	1,1	6,6	3,5	0,7	13	11,37
Na ⁺	2,8	90,9	60,5	1,8	1,68	151	110
CN ⁻			0,019				6,17
SO ₄ ²⁻	288,5	123	250	73,7	1,65	38,1	342,5
Cl ⁻	<10	59,1	214	3,1		0,1	59,1
HCO ₃	41	268	428	30,8	275,6	20	30,5
NH ₄	0,26	<0,05	<0,05	1,2	0,08	0,21	2,14
pH	8	8,1	12	7,3	8	10,2	9,5

флотируемость халькопирита, галенита и серебряных минералов ионы Pb и Zn не оказывают никакого влияния, являясь активаторами при определенных концентрациях для пирита и сфалерита. Ионы цинка оказывают сильное депрессирующее действие на сфалерит. Ионы меди при определенных расходах активируют пирит и сфалерит, но при высоких концентрациях депрессируют все сульфиды. Активирующее действие этих ионов на флотоактивность породы носит волнообразный характер и значительно зависит от pH пульпы [7].

Специальными исследованиями установлено, что ионы меди, свинца и цинка часто приводят к их выщелачиванию из пустой породы при измельчении руды, таких, как кальций, магний, хлор, в то время как они сами зачастую не обнаруживаются в измельченной пульпе, поскольку сорбируются на поверхности этих минералов [8]. Увеличение содержания в пульпе ионов кальция и хлора отрицательно влияет на флотацию золота и серебра, которые попутно извлекаются в медные и свинцовые концентраты.

Электрохимические связи между минералами и мелющей средой в мельнице влияют на коррозионный износ шаров и свойства поверхности минералов (рис. 6). Обычно минералы ведут себя как катоды, а мелющая среда — как аноды, которые обогащают ионами железа пульпу, что негативно влияет на флотацию всех сульфидных минералов [9].

При многократном возврате в технологический процесс оборотной воды содержание в ней накопленных веществ меняется незначительно и носит сезонный характер, но изначально их состав формируется из:

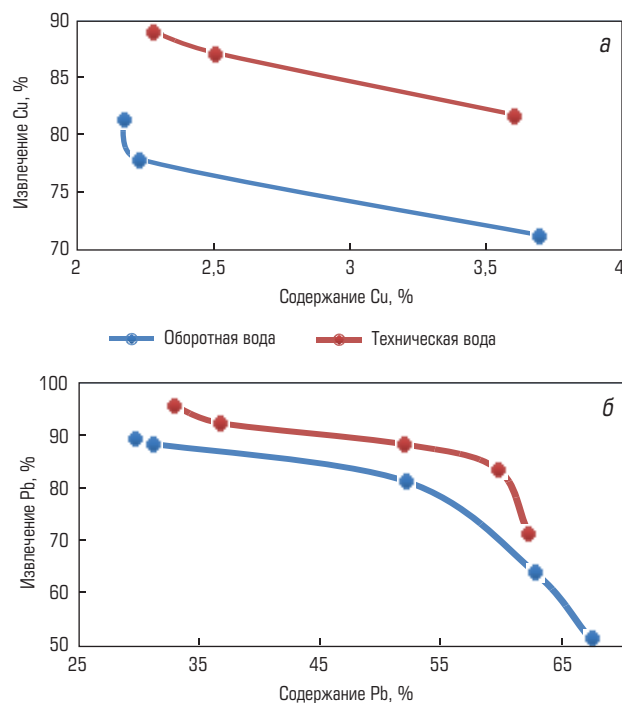


Рис. 7. Показатели обогатимости шихты руд месторождений Дружково и Дружба по извлечению медных минералов (а) и галенитов (б) при использовании технической и оборотной воды на Лакинской обогатительной фабрике

- водорастворимых минеральных компонентов, содержащихся в руде;
- водорастворимых компонентов природной воды данного региона;
- флотационных реагентов, растворяющих горные породы и минералы.

В водных вытяжках из полиметаллических руд месторождений Джурково, Дружба и Корбалихинское и природной воде содержание ионов тяжелых металлов невысокое, поскольку в рудах отсутствуют водорастворимые минеральные формы (табл. 4). Накопление ионов тяжелых и легких металлов происходит в данном случае за счет действия реагентов, вызывающих растворение минералов и горных пород.

По существующей технологии на Лакинской обогатительной фабрике применяют цианидный режим разделения минералов свинца от сфалерита и пирита, когда в качестве регулятора среды применяется сода, что приводит к накоплению в оборотной воде ионов меди, свинца, цинка, железа, кальция и CN^- .

Изучение ионного состава жидкой фазы пульпы после измельчения шихты руд с содой и известью показало, что при применении соды происходит увеличение содержания ионов свинца (34,5 мг/л) и железа (44,9 мг/л). Скорее всего это связано с тем, что в руде месторождения Джурково содержится плюмбюрозит

($\text{PbFe}_6[\text{SO}_4]_4[\text{OH}]_{12}$), который разлагается в содовом растворе с образованием в пульпе ионов свинца и железа [10].

Для оценки влияния ионного состава воды на извлечение медных минералов (рис. 7, а), галенита (см. рис. 7, б и рис. 8) и минералов серебра (рис. 9) в медно-свинцовый концентрат из шихты руд месторождений Джурково и Дружба были проведены открытые флотационные опыты по бесцианидной технологии (см. рис. 4) на оборотной и технической воде Лакинской ОФ.

Интересно, что на результаты опытов по извлечению меди и серебра без применения цианида отрицательно сказалось его наличие в оборотной воде в количестве 6,17 мг/л. Извлечение меди в Cu-Pb-концентрат на технической воде составило 81,7 %, а на оборотной — 71,14 %; извлечение серебра в суммарный медно-свинцовый концентрат за счет оборотной воды снизилось с 94 до 88 %. Из рис. 8 видно, что при применении оборотной воды замедляется скорость флотации не только медных, но и свинцовых минералов.

Технология селекции медно-свинцового концентрата

Выбор способа селекции медно-свинцового концентрата зависит от его вещественного состава. В случае преобладания в медно-свинцовом концентрате минералов свинца над минералами меди целесообразно проводить бесцианидное разделение, когда свинцовый концентрат получают в виде камерного, а медный — в виде пенного продукта. Для флотации медных минералов использовали восстановительный метод, основанный на применении сульфоксидных соединений:

- сульфита натрия или тиосульфата натрия в сочетании с железным купоросом или жидким стеклом;
- сульфита натрия или метабисульфита натрия в сочетании с водорастворимым крахмалом.

Сульфоксидные ионы способны вытеснять с поверхности галенита, пирита и сфалерита ионы меди подобно цианиду, практически не влияя на флотируемость меди, в отличие от цианидов. По бесцианидной технологии разделения медно-свинцового концентрата, которое происходит в кислой среде, минералы цинка всегда переходят в свинцовый концентрат, поэтому важно, чтобы в питании разделения было как можно меньше сростков медных минералов и сфалерита, что достигается благодаря операции пульпоподготовки в технологической машине Zimar в медно-свинцовом цикле флотации.

Роль реагентного режима на селективность разделения медных и свинцовых минералов из шихты руд месторождений Джурково и Дружба наглядно видна на рис. 10. Обращает на себя внимание характер кривой, построенной по результатам опыта, проведенного без отмывки концентрата после его десорбции, связанный с существенным нарушением селективности процесса разделения.

Результаты открытых флотационных опытов по различным методам разделения медно-свинцового концентрата показали следующее:

- наиболее высокие технологические показатели получены при использовании в качестве депрессора галенита железного купороса в сочетании с водорастворимым крахмалом;

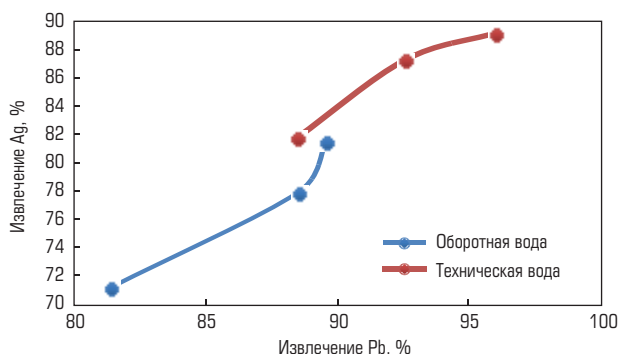


Рис. 8. Связь между извлечением меди и свинца в медно-свинцовый концентрат

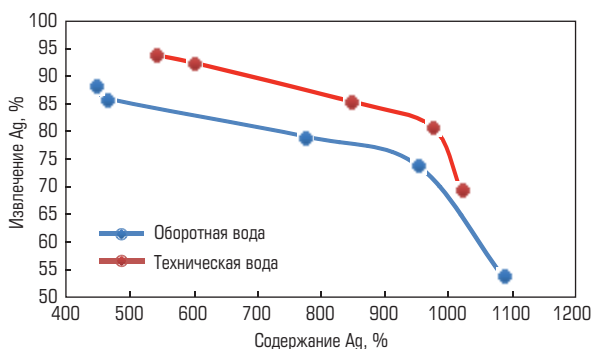


Рис. 9. Показатели обогатимости шихты руд месторождений Джурково и Дружба по извлечению серебра в медно-цинковый концентрат

- во всех опытах получено высокое качество медного концентрата по содержанию в нем меди;
- пиросульфит натрия $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ обеспечивает более высокие показатели разделения при подаче его в процесс вместе с крахмалом.

Из-за высокого содержания пирита в руде месторождения Корбалихинское было получено более низкое качество медно-свинцового концентрата, поэтому его селекцию осуществляли в два этапа: после проведения медного цикла хвосты контрольной медной флотации сгущали, отмывали свежей технической водой и направляли в свинцовый цикл, где по цианидной технологии проводили селекцию галенита от сфалерита и пирита. Реагентный режим медного цикла флотации аналогичен применяемому для шихты руд.

Технология получения цинкового концентрата

При обогащении вкрапленных полиметаллических руд часто возникает необходимость повышения качества концентрата за счет снижения содержания в нем кремнезема с 8–10 до 1–1,5 %.

Минералы пустой породы снижают качество сульфидных концентратов в результате двух различных механизмов: истинной флотации и захвата. Истинная флотация происходит в результате прилипания частиц к воздушным пузырькам и зависит от гидрофобности поверхности частиц, в то время как захват зависит от таких свойств пульпы, как крупность частиц минералов и ее плотности, а также от типа применяемого вспенивателя. Нерудные минералы по-разному ведут себя под воздействием этих процессов.

Пироксен, не являясь флотоактивным минералом активно сорбирует собиратель, присутствуя в относительно небольших количествах, тем самым вызывая необходимость его дополнительной дозировки, что, в свою очередь, нарушает селективность процесса разделения, создавая сильную пену и увлекая другие нерудные минералы в концентраты [11]. Депрессанты на основе полисахаридов типа карбоксиметилцеллюлозы и измененных гуаровых смол используют для предотвращения флотации нерудных минералов, которые были активизированы ионами тяжелых металлов. В присутствии большого количества ионов кальция в питании цинковой флотации наблюдается депрессия пироксена и хромита этими реагентами, но не происходит депрессии кварца.

Результаты изучения влияния различных ионов на флотируемость кварца в присутствии ксантогената показывали, что ионы тяжелых металлов, такие, как Fe^{3+} , Cu^{2+} , и Pb^{2+} , могут вызывать его активную флотацию сульфгидрильными собирателями в пределах $\text{pH} = 10 \div 11$.

В некоторых операциях сульфидной флотации в жидкой фазе пульпы и в оборотной воде содержатся высокие концентрации ионов Ca^{2+} и SO_4^{2-} , которые превышают предел растворимости гипса [12]. Гипс в цинковом цикле флотации кристаллизуется на поверхности кварца и сфалерита, что приводит к нарушению селективности флотации. Это связано с тем, что гипсовые игольчатые осадки снижают флотируемость сфалерита, а флотируемость кварца анионными коллекторами значительно возрастает. Покрытие ионами Ca^{2+} делает одинаковой поверхность диоксида крем-

ния и сфалерита. Это подтверждается данными измерения дзета-потенциала диоксида кремния и сфалерита в перенасыщенном растворе гипса.

Воздействовать на этот процесс физико-химическими методами в цинковом цикле флотации невозможно, поскольку с хвостами свинцового цикла туда приходит пульпа, содержащая до 86 мг/л Ca^{2+} и 997 мг/л ионов SO_4^{2-} , а для успешного его проведения дополнительно подается известь и медный купорос; процесс флотации ведется в благоприятном для активации кварца диапазоне pH. В связи с этим были проведены опыты по определению влияния операции пульпоподготовки перед основными операциями цинкового цикла флотации.

Для решения проблемы повышения качества цинкового концентрата и снижения в нем кремнезема были выбраны три основных направления, которые могут быть реализованы в промышленных условиях:

- повышение содержания цинковых минералов в питании цинковой флотации за счет сброса части пустой породы хвостами цинк-пиритной флотации;

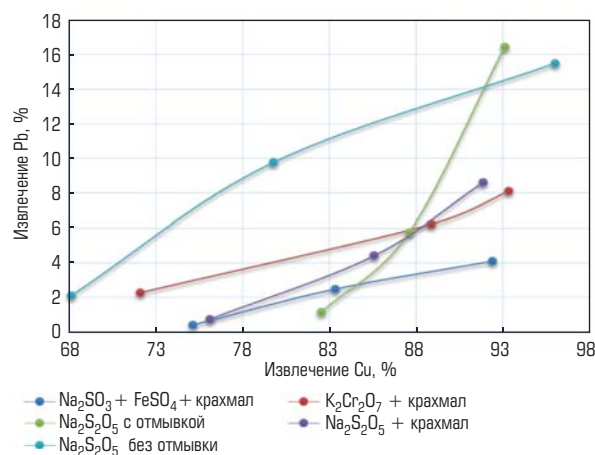


Рис. 10. Влияние технологии разделения Cu-Pb-концентрата на селективность медных минералов и галенита

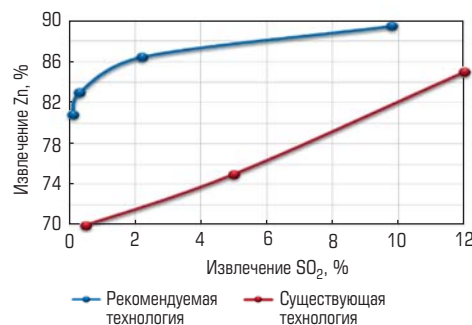


Рис. 11. Характер флотации сфалерита и силикатов в цикле Zn-флотации

- восстановление флотуемости сфалерита, задепрессированного в медно-свинцовом цикле флотации, очистка поверхности кварца в аппарате специальной конструкции;
- снижение эффекта захвата пустой породы за счет применения селективных собирателей и вспенивателей.

На рис. 11 приведены кривые обогатимости в цинковом цикле флотации, построенные по данным открытых флотационных опытов на шихте руд месторождений Джурково и Дружба по существующей и рекомендуемой технологии. Особенность технологии получения цинкового концентрата — низкая щелочность (140 мг/л свободного CaO) в цинк-пиритном цикле флотации, специальная операция пульпоподготовки хвостов медно-свинцового цикла, цинк-пиритного концентрата — применение в каче-

стве собирателя, модифицированного тиокарбоната МХ-525. Это позволило получить цинковый концентрат, содержащий 57,4 % Zn, 4,5 % Fe и 1,15 % SiO₂ с высоким извлечением 86,3 %. По существующей технологии извлечение цинка в концентрат такого же качества составило 74,64 %.

Технологические показатели

Результаты обогащения полиметаллической шихты руд месторождений Джурково и Дружба и месторождения Корбалихинское (табл. 5), наглядно свидетельствуют о целесообразности применения бесцианидных режимов флотации свинцовых и медных минералов, поскольку при сохранении извлечения свинца извлечение меди на 10–20 % выше по бесцианидной технологии. Включение в схему

Таблица 5. Показатели обогащения полиметаллических руд

Продукт	Выход, %	Содержание, %				Извлечение, %			
		Cu	Pb	Zn	Ag*	Cu	Pb	Zn	Ag
<i>Обогащение шихты руд месторождений Джурково и Дружба по новой технологии</i>									
Cu-концентрат	0,87	20,47	5,83	1,57	212	75,95	1,78	0,89	4,50
Pb-концентрат	3,69	0,2	70,1	2,5	911	3,16	90,50	5,98	82,00
Cu-Pb-концентрат	4,56	4,07	57,84	2,32	778	79,11	92,11	6,87	86,5
Zn-концентрат	2,32	0,8	2,01	57,4	170	7,93	1,63	86,30	9,60
Хвосты контрольной Zn-флотации	12,30	0,05	0,30	0,20	3,33	2,64	1,29	1,59	1,00
Хвосты Zn-Pb-флотации	80,82	0,03	0,17	0,10	1,47	10,32	4,80	5,24	2,90
Хвосты отвальные	93,12	0,03	0,19	0,11	1,72	12,96	6,09	6,83	3,90
Шихта руд	100,00	0,23	2,86	1,54	41,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Обогащение шихты руд месторождений Джурково и Дружба по цианидной технологии</i>									
Pb-концентрат	4,47	2,15	74,2	3,25	837	55,94	93,34	6,06	84,33
Zn-концентрат	2,98	1,3	0,8	60,05	78	22,53	0,67	74,64	5,24
Хвосты отвальные	92,55	0,04	0,23	0,5	5	21,53	5,99	19,30	10,43
Шихта руд	100,00	0,17	3,55	2,40	44,37	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Обогащение руды месторождения Корбалихинское по сульфокситной технологии (СП ЗАО «ИВС»)**</i>									
Cu-концентрат	3,25	21,05	3,24	7,22	190	74,36	4,02	3,79	11,96
Pb-концентрат	4,21	0,95	50	7,5	355	4,35	80,33	5,10	28,93
Cu-Pb-концентрат	7,46	9,71	29,63	7,38	283,14	78,11	84,35	8,89	40,89
Zn-концентрат	9,99	1,30	1,46	52,70	116	14,12	5,57	85,10	22,36
Хвосты отвальные	82,55	0,08	0,32	0,45	23	7,17	10,08	6,01	36,75
Руда	100,00	0,92	2,62	6,19	51,66	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Обогащение руды месторождения Корбалихинское по цианидной технологии (Уралмеханобр)</i>									
Cu-концентрат	4,49	20,5	2,1	7,5	145	65,27	4,69	3,43	12,03
Pb-концентрат	3,45	2,05	45,5	7,1	272	5,01	78,14	2,50	17,30
Cu-Pb-концентрат	7,94	12,48	20,96	7,1	200,5	107,71	63,51	9,41	30,82
Zn-концентрат	17,17	1,7	0,7	50	100	20,70	5,98	87,50	31,50
Хвосты отвальные	74,89	0,17	0,30	0,86	28,40	9,02	11,19	6,57	39,17
Руда	100,00	1,41	2,01	9,81	54,29	100,00	100,00	100,00	100,00

* Содержание Ag приведено в г/т.

** Проектные показатели.

операций цинк-пиритной флотации с использованием специальных технологических аппаратов в сочетании с селективными реагентами позволило снизить потери цинка с отвальными хвостами на 12 %.

Заключение

Флотационные опыты, проведенные на шихте руд месторождений Джурково и Дружба и месторождения Корбалихинское, несмотря на значительное различие в вещественном составе, позволили определить основные параметры технологического процесса, характерные для обоих типов руд, и сделать следующие выводы.

1. Бесцианидная технология позволяет обеспечить наиболее высокое извлечение медных и благородных минералов при обогащении крупновкрапленных руд и с небольшим расходом цианида, подаваемого в перемешивание медно-свинцового концентрата.

2. В качестве депрессора сфалерита по бесцианидной технологии в медно-свинцовой флотации наиболее эффективно использование сочетание сульфида натрия и цинкового купороса в соотношении 1:2 и пиросульфида натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) при pH = 8,2÷8,5, создаваемой известью, которая подается в процесс измельчения.

3. Для достижения максимальной селективности разделения в каждом цикле флотации целесообразно применять специальный селективный собиратель, например в медно-свинцовом цикле Aerophine-3418A (иногда в сочетании с бутиловым ксантогенатом), в медном Aero-9863, в цинковом MX-525.

4. В цикле селекции медно-свинцового концентрата депрессия галенита достигается сочетанием железного купороса, крахмала и сульфита натрия при флотации медных минералов селективным по отношению к галениту собирателем Aero-9863.

5. Пульпоподготовка в специальном аппарате Zimar позволяет в сочетании с селективными реагентами достичь высокой эффективности разделения сульфидных минералов в различных операциях технологической схемы.

6. Текстурно-структурные особенности руд оказывают большое влияние на выбор технологии рудоподготовки: тонину помола, необходимость стадийного извлечения минералов. Технологии переработки полиметаллических руд в целом и отдельные ее составляющие, которые приведены в этой статье, запатентованы.

Библиографический список

1. K. Hanumantha Rao, Chernyshova I. V. Challenges in Sulphide Mineral Processing // The Open Mineral Processing Journal, 2011. Vol. 4. P. 7–13.
2. Vassileva R. D., Atanassova R., Kouzmanov K. Compositional variations of the tennantite-tetrahedrite series from the madan Pb-Zn deposits, Bulgaria: Oscillatory zoning and conditions of formation. *Acta Mineralogica-Petrographica, Abstract Series*. Szeged. 2012. Vol. 7.
3. Шумская Е. Н., Поперечникова О. Ю., Тихонов Н. О. Разработка технологии обогащения труднообогатимой колчеданной полиметаллической руды Корбалихинского месторождения // Горный журнал, 2014. № 11. С. 78–83.
4. Baştürkü H., Yenial Ü., Kökkiliç O., Yüce A. E., Erdoğan E. B. Beneficiation of Copper, Lead and Zinc Concentrates From Complex Ore By Using Environmentally Friend Reagents // The XIII International Mineral Processing Symposium. 10-12 October, 2012. — Bodrum, Turkey, 2012. P. 349–355.
5. Bulut G., Ceylan A., Soylu B., Goktepe F. Role of Starch and Metabisulphite on Pure Pyrite and Pyritic Copper Ore Flotation // *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2011. Vol. 48(1). P. 39–48.
6. Шумская Е. Н., Соловьева Л. М., Поперечникова О. Ю. Совершенствование технологии обогащения полиметаллической руды Артемьевского месторождения (ТОО «Корпорация Казахмыс», Казахстан) // Горный журнал. 2012. № 11. С. 63–67.
7. Coetzer G., du Preez H. S., Bredenhann R. Influence of water resources and metal ions on galena flotation of Rosh Pinah ore // *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2003. Vol. 103. No. 3. P. 193–207.
8. Jun-ya Cao, Guang-ji Zhang, Zai-sha Mao, Zhao-heng Fang, Chao Yang, Bao-ling Han. Influence of Mg^{2+} on the growth and activity of sulfate reducing bacteria // *Hydrometallurgy*. 2009. Vol. 95. P. 127–134.
9. Adam K., Natarajan K. A., Iwasaki I. Grinding media wear and its effect on flotation of sulphide minerals Int. // *Mineral Processing Journal*. 1984. Vol. 12. P. 39.
10. Лу А. Ф. Минералогическое исследование руд цветных и редких металлов. — М.: Наука, 1967. — 260 с.
11. Flotation Frothers: Review of Their Classifications, Properties and Preparation // *Mineral Processing Journal*. 2011. Vol. 4. P. 25–44.
12. Hao Ren, Mengqi Ren, Jing Ning, Zhen Li. Research on the Interaction between Sphalerite and Silica Particles with Different Calcium Ion Solutions // *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2013. Vol. 1. No. 4. [PDF](#)

«GORNYI ZHURNAL»/«MINING JOURNAL», 2016, № 11, pp. 39–48
DOI: [dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.08](https://doi.org/10.17580/gzh.2016.11.08)

Features of complex ore processing technology

Information about authors

E. N. Shumskaya¹, Leading Researcher, Candidate of Engineering Sciences, rivs@rivs.ru

O. Yu. Poperechnikova¹, Head of a sector

A. V. Kuptsova¹, Mineralogist

¹ IVS Joint Venture, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

A feature of complex ores is a wide diversity of stages and conditions of minerogenesis, ratios of ore and rock-forming minerals, ore body configurations as well as texture and structure.

Ore can be of different genetic types but some characteristics of the material constitution of ores govern their process properties: dissemination and size of sulfide minerals, their intergrowth degree, ratio of extractable and nonextractable minerals, selectively unfavorable ratio of Cu: Pb: Zn: Py, presence of clay and micaceous minerals, presence of chemically active hydrophilic rocks that actively adsorb collecting agents (pyroxene, coal-bearing carbonate, talcum, hydromica, etc.), presence of minerals favoring generation of ions of heavy metals in pulp, and acid-base characteristics capable to change pulp pH.

The integrated mineralogical analysis of complex ores yielded basic technological parameters for their processing: stages and cycles of mineral extraction, use of selective agents, studies of liquid phase in

mineral pulp during grinding and flotation, and employment of pulp processing machine Zimar. Developed based on extensive laboratory testing, the new complex ore processing technology ensures high selectivity of separation of lead, copper and zinc minerals irrespective of the material constitution of ore, and has no negative effects on the environment.

Keywords: complex ore, copper-lead concentrate selection, flotation agents.

References

1. K. Hanumantha Rao, Chernyshova I. V. Challenges in Sulphide Mineral Processing. *The Open Mineral Processing Journal*. 2011. Vol. 4. pp. 7–13.
2. Vassileva R. D., Atanassova R., Kouzmanov K. Compositional variations of the tennantite-tetrahedrite series from the madan Pb-Zn deposits, Bulgaria: Oscillatory zoning and conditions of formation. *Acta Mineralogica-Petrographica, Abstract Series*. Szeged. 2012. Vol. 7.
3. Shumskaya E. N., Poperechnikova O. Yu., Tikhonov N. O. Development of technology of concentration of complex pyrite polymetallic ore of Korbalikhinskoe deposit. *Gornyi Zhurnal*. 2014. No. 11. pp. 78–83.
4. Baştürkü H., Yenial Ü., Kökkiliç O., Yüce A. E., Erdoğan E. B. Beneficiation of Copper, Lead and Zinc Concentrates From Complex Ore By Using Environmentally Friend Reagents. *The XIII International Mineral Processing Symposium. 10–12 October, 2012*. Bodrum, Turkey, 2012. pp. 349–355.
5. Bulut G., Ceylan A., Soylu B., Goktepe F. Role of Starch and Metabisulphite on Pure Pyrite and Pyritic Copper Ore Flotation. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2011. Vol. 48(1). pp. 39–48.

6. Shumskaya E. N., Soloveva L. M., Poperechnikova O. Yu. Improvement of the concentration technology of polymetallic ore of Artemevskoe deposit (Kazakhstan PLC, Republic of Kazakhstan). *Gornyi Zhurnal*. 2012. No. 11. pp. 63–67.
7. Coetzer G., du Preez H. S., Bredenhann R. Influence of water resources and metal ions on galena flotation of Rosh Pinah ore. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2003. Vol. 103, No. 3. pp. 193–207.
8. Jun-ya Cao, Guang-ji Zhang, Zai-sha Mao, Zhao-heng Fang, Chao Yang, Bao-ling Han. Influence of Mg^{2+} on the growth and activity of sulfate reducing bacteria. *Hydrometallurgy*. 2009. Vol. 95. pp. 127–134.
9. Adam K., Natarajan K. A., Iwasaki I. Grinding media wear and its effect on flotation of sulphide minerals. *International Mineral Processing Journal*. 1984. Vol. 12. p. 39.
10. Li A. F. Mineralogical investigation of non-ferrous and rare metal ores. Moscow : Nauka, 1967. 260 p.
11. Flotation Frothers: Review of Their Classifications, Properties and Preparation. *Mineral Processing Journal*. 2011. Vol. 4. pp. 25–44.
12. Hao Ren, Mengqi Ren, Jing Ning, Zhen Li. Research on the Interaction between Sphalerite and Silica Particles with Different Calcium Ion Solutions. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. 2013. Vol. 1, No. 4.

УДК 622.7:622.343

ПОПУТНОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЗОЛОТА ИЗ СУЛЬФИДНЫХ МЕДНЫХ И МЕДНО-ЦИНКОВЫХ РУД*

М. А. АРУСТАМЯН¹, исполнительный директор, канд. техн. наук
Л. А. НЕМЧИНОВА², начальник, канд. техн. наук, ufa@rivs.ru
В. В. ЗАКОПАЙЛО³, начальник ПТО обогатительной фабрики
Д. М. АЛТЫНАМАНОВ³, зам. начальника главного корпуса обогатительной фабрики

¹ СП ЗАО «ИВС», Санкт-Петербург, Россия

² Уральское представительство НПО «РИВС», Учалы, Россия

³ АО «Учалинский ГОК», Учалы, Россия

Введение

В настоящее время золото добывают из руд, причем не только собственно золотосодержащих, но и таких, в которых основными полезными компонентами являются другие металлы, в частности медь, цинк, серебро, свинец. В этом случае извлечение золота рассматривается как попутное. Во всех промышленно развитых странах, где ведется добыча цветных металлов, преобладает направление на комплексное использование минерального сырья. Содержание золота в рудах цветных металлов, как правило, значительно ниже, чем непосредственно в золоторудных, однако издержки производства на его добычу при этом могут быть несколько меньше.

Золото в вовлекаемых в переработку медно-цинковых рудах в значительной степени ассоциировано с сульфидами. Основная масса представлена мелкими и очень мелкими классами. В связи с этим большое значение приобретает изыскание технологий, позволяющих перерабатывать данные руды с максимально возможным извлечением золота.

На горнорудных предприятиях, осуществляющих добычу и переработку сульфидных медных и медно-цинковых руд, удалось за последние 10 лет повысить извлечение профильных металлов в концентраты (80–92 % для меди и 76–81 % для цинка) [1,2]. Однако извлечение золота из данных руд является невысоким и находится в пределах от 7 до 30 %. Низкие показатели извлечения золота обусловлены рядом причин, в том числе существующими на обогатительных фабриках (ОФ) схемами и реагентными режимами, которые оптимальны для флотации основных медных минералов и не являются таковыми для флотации золота. К числу причин низких показате-

Предложен метод интенсификации попутного извлечения золота в процессе флотации руд Узельгинского и Учалинского месторождений, разработанного на основе результатов исследования вещественного состава золота и распределения благородных металлов в рудах и продуктах обогащения.

Ключевые слова: рациональный анализ золота, сульфидные медно-цинковые руды, медный концентрат, флотация, попутное извлечение золота, технологические показатели.

DOI: dx.doi.org/10.17580/gzh.2016.11.09

телей извлечения золота относится также сложный вещественный состав золота в перерабатываемых рудах [3, 4].

Колчеданные месторождения Урала являются важнейшим в России источником попутного извлечения золота и серебра (5 % общей добычи золота и 40 % серебра). В результате многолетних исследований по всем известным в настоящее время разновидностям золото- и серебросодержащих руд сульфидные медные и медно-цинковые руды можно отнести к особой категории минерального сырья — к упорным рудам с позиции извлечения золота. В настоящей статье авторами исследован вещественный состав золота в рудах и продуктах обогащения Учалинского, Узельгинского и других месторождений, на основании чего предложен метод интенсификации попутного извлечения золота в процессе флотации в медный концентрат.

Методика и результаты исследования

Для формирования путей совершенствования технологии попутного извлечения золота из сульфидных руд было изучено распределение форм золота в продуктах измельчения на различных обогатительных фабриках (табл. 1).

Расчет распределения форм золота во всех представленных сульфидных рудах показал невысокую долю амальгамируемого ($\leq 13,04$ %) и значительную часть цианируемого золота (до 63,19 %).

Следует отметить, что при качестве медного концентрата 19,5 % из руд, перерабатываемых на Учалинской ОФ и 10 % на

* В работе принимали участие старший научный сотрудник НПО «РИВС» М. И. Ткаченко и начальник исследовательской лаборатории АО «УГОК» Ю. Р. Ягудина.