УДК 622.7

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-85-96

Флотоклассификация в замкнутом цикле измельчения как один из способов снижения переизмельчения сульфидных руд

Морозов Ю. П.^{1*}, Интогарова Т. И.², Валиева О. С.², Донец Ю. О.²

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

² Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета
им. М. К. Амосова, г. Екатеринбург, Россия

*e-mail: tails2002@inbox.ru

Реферат

Предмет и цель работы. Одним из направлений повышения показателей флотационного обогащения медных руд за счет снижения переизмельчения минералов является использование процесса флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения. За счет извлечения в пенный продукт флотоклассификации ценных компонентов по мере их вскрытия в процессе измельчения существенно снижаются потери меди в хвосты флотации со вторичными шламами. Целью данной работы является изучение возможностей совершенствования флотационного обогащения медных руд на основе использования флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения.

Методология. Для решения поставленной задачи проведены лабораторные исследования по экспериментальному моделированию замкнутого цикла измельчения в режимах без флотоклассификации и с флотоклассификацией слива гидравлической классификации. В каждом режиме измельчения реализовано по пять ступеней имитации замкнутого цикла. Флотоклассификацию осуществляли в режимах пенной сепарации с обогащением пенного продукта в сужающемся желобе и без него. По результатам экспериментов определены потери меди со шламами в сливах гидравлической классификации и флотоклассификации, рассчитан баланс по конечным продуктам флотоклассификации при работе в замкнутом цикле измельчения.

Выводы. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о возможности совершенствования флотации медных руд за счет снижения переизмельчения минералов при флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения. Технология флотоклассификации с обогащением пенного продукта в сужающихся желобах позволяет получать в верхнем продукте желоба кондиционный концентрат с массовой долей меди 18 % при извлечении в него меди 37,7 %, отвалы хвосты в сливе флотоклассификации с массовой долей меди 0,13 % при потерях 2 %.

Ключевые слова: замкнутый цикл измельчения; переизмельчение минералов; флотоклассификация; сужающиеся желоба; технологические показатели; рекомендации.

Сульфидные руды отличаются сложным вещественным составом, разнообразием текстурно-структурных параметров, наличием генераций сульфидов, обладающих различными физико-механическими свойствами, плотностью, микротвердостью, содержанием различных микровключений [1–3].

Высокое взаимопрораствание полезных минералов определяет трудности их раскрытия в процессе измельчения. Наблюдается переизмельчение и образование вторичных шламов [4].

В реальных условиях зерна минералов в руде находятся в широком диапазоне крупности, имеют различные формы и распределены в породе неравномерно. Образующиеся в процессе измельчения вторичные шламы обладают низкими флотационными свойствами и оказывают отрицательное влияние на процесс флотации флотируемых минералов [5–11].

Таким образом, недораскрытие минеральных сростков и образование вторичных шламов в процессе измельчения являются основными причинами больших потерь металлов в отвальных хвостах флотации и в разноименных концентратах.

В результате теоретического анализа раскрытия минеральных фаз при подготовке руды к обогащению [6] сформулированы принципы выделения технологических классов крупности и построения схемы обогащения на основе характеристик раскрытия и гранулометрического состава руды. В соответствии

Рис. 1. Схема проведения опытов по имитации замкнутого цикла измельчения в режиме без флотоклассификации

Fig. 1. Test flow chart of closed-circuit grinding simulation in a mode without flotation classification

с принципами Г. О. Чечотта: «Не дробить ничего лишнего!» и В. З. Козина «Не обогащать ничего лишнего!» при формировании схем обогащения целесообразно выделять частицы ценного компонента в концентрат, а частицы пустой породы – в хвосты по мере их вскрытия, что резко снижает переизмельчение минералов.

В практике обогащения для снижения переизмельчения минералов применяют различные направления, в том числе: избирательное разрушение при формировании структурных элементов разделения и раскрытие на каждой стадии пере-

работки сырья [12], принцип фракционного концентрирования, который используется в схемах стадийной флотации [13, 14].

Одним из эффективных методов повышения показателей флотации за счет снижения переизмельчения минералов является использование процесса флото-классификации в замкнутом цикле измельчения [15, 16].

Рис. 2. Зависимость выхода слива γ от количества ступеней имитации замкнутого цикла измельчения с гидравлической классификацией

Fig. 2. Dependence between γ discharge output and the number of stages in the closed-circuit grinding simulation with hydraulic classification

Флотоклассификация в замкнутом цикле измельчения позволяет извлекать в пенный продукт флотируемые компоненты по мере их вскрытия, что резко снижает переизмельчение минералов и образование вторичных шламов [17, 18].

С целью определения эффективности использования флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения выполнено экспериментальное моделирование процесса.

Таблица 1. Результаты распределения меди по классам крупности слива гидравлической классификации

Table 1. Results of copper distribution by particle size classes of hydraulic classification discharge

Продукт	Выход, %	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %
Класс крупности $-0,01$ мм	7,79	2,95	8,76
Класс крупности $-0,071+0,01$ мм	59,31	2,05	60,79
Класс крупности $+0,071$ мм	32,90	1,85	30,45
Итого	100,00	2,00	100,00

В лабораторных условиях на медной руде Еленовского месторождения, дробленой до крупности 1,4 мм, реализованы опыты по имитации замкнутого цикла измельчения в режимах без флотоклассификации и с флотоклассификацией слива гидравлической классификации.

Схема проведения опытов по имитации замкнутого цикла измельчения в режиме без флотоклассификации приведена на рис. 1.

Рис. 3. Схема проведения опытов по имитации замкнутого цикла измельчения в режиме с флотоклассификацией
 Fig. 3. Test flow chart of closed-circuit grinding simulation in a mode with flotation classification

Исходную навеску 1 массой 500 г подвергали измельчению в лабораторной шаровой мельнице в течение 15 мин. Измельченную навеску подвергали гидравлической классификации 1 в лабораторном конусном гидрокласификаторе с получением слива 1 и песков 1. Пески гидравлической классификации 1 объединяли с исходной навеской 2 массой 500 г и подвергали измельчению 2 и гидравлической классификации 2 с получением слива 2 и песков 2.

Далее аналогично измельчали исходную навеску 3 с песками 2, исходную навеску 4 с песками 3 и исходную навеску 5 с песками 4. В результате эксперимента получены сливы гидравлической классификации 1, 2, 3, 4, 5 и пески 5.

Рис. 4. Установка для проведения экспериментальных исследований по флотоклассификации:

1 – зумпф; 2 – насос; 3, 4 – краны; 5 – флотокласификатор

Fig. 4. Flotation classification test facility:

1 – sump; 2 – pump; 3, 4 – valves; 5 – flotation classifier

Продолжительность измельчения в каждой ступени увеличивали пропорционально увеличению суммарной массы навески с песками по отношению к массе исходной навески. Она составляла во 2-й ступени 24 мин, в 3-й ступени – 30 мин, в 4-й ступени – 34 мин, в 5-й ступени – 36 мин.

Сливы всех ступеней имитации замкнутого цикла измельчения с гидравлической классификацией взвешивали и определяли выход.

По полученным данным построена зависимость выхода слива γ от количества ступеней, которая приведена на рис. 2.

Установлено, что после 5 ступеней измельчения выход слива 5 составил 97,5 %, что соответствует ошибке воспроизводимости замкнутого цикла измельчения 2,5 %. Циркулирующая нагрузка в условиях эксперимента составила 140 %.

В сливе 5 гидравлической классификации 5 определили массовую долю шламов (класс крупности $-0,01$ мм) методом отмучивания и массовую долю класса крупности $-0,071$ мм методом отмывки на сите $0,071$ мм.

Полученные классы крупности слива 5 подвергали химическому анализу на медь. Результаты распределения меди по классам крупности приведены в табл. 1.

Установлено, что измельчение в замкнутом цикле с гидравлической классификацией приводит к переизмельчению медных минералов. При выходе класса $-0,01$ мм 7,79 % массовая доля меди в нем составила 2,95 % при извлечении в него меди 8,76 %. Очевидно, что переизмельчение медных минералов приводит к повышению потерь меди с хвостами флотации.

Рис. 5. Зависимость суммарного выхода пенного продукта и слива γ от количества ступеней имитации замкнутого цикла измельчения с флотоклассификацией
Fig. 5. Dependence between the yield of froth and discharge γ on the number of stages in the closed-circuit grinding simulation with flotation classification

Схема проведения опытов в режиме имитации замкнутого цикла измельчения с флотоклассификацией слива гидравлической классификации приведена на рис. 3.

Отличием замкнутого цикла измельчения с флотоклассификацией является получение более крупных песков в гидравлической классификации. Крупность разделения в гидравлической классификации составляет 200 мкм.

Флотоклассификации подвергали слив гидравлической классификации. Флотоклассификацию осуществляли в лабораторном флотоклассификаторе, принципиальная схема которого приведена на рис. 4.

Аппарат работает в режиме пенной сепарации. Исходное питание подавали на пену сверху. В качестве флотационных реагентов использовали известь 0,5 кг/т, бутиловый ксантогенат калия 40 г/т и вспениватель Т-92 60 г/т.

Сливы и пенные продукты флотоклассификации всех ступеней имитации замкнутого цикла измельчения с флотоклассификацией слива гидравлической классификации взвешивали и определяли их выход. По полученным данным построена зависимость суммарного выхода слива и пенного продукта от количества ступеней, которая приведена на рис. 5.

Установлено, что после пяти ступеней имитации замкнутого цикла измельчения с флотоклассификацией суммарный выход слива и пенного продукта флотоклассификации 5 составил 97 %, что соответствует ошибке воспроизводимости замкнутого цикла 3 %. Циркулирующая нагрузка при этом составила 137 %.

Таблица 2. Результаты распределения меди по классам крупности слива флотоклассификации
Table 2. Results of copper distribution by particle size classes of flotation classification discharge

Продукт	Выход, %	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %
Класс крупности $-0,01$ мм	3,10	0,60	0,96
Класс крупности $-0,071+0,01$ мм	65,30	2,06	67,44
Класс крупности $+0,071$ мм	31,60	2,00	31,60
<i>Итого</i>	100,00	1,23	100,00

В сливе флотоклассификации пятой ступени имитации определяли массовую долю шламов (класса $-0,01$ мм) методом отмучивания и массовую долю класса $-0,071$ мм методом отмывки на сите.

Полученные классы слива флотоклассификации 5 подвергнуты химическому анализу на медь.

Таблица 3. Баланс по конечным продуктам флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения
Table 3. Flotation classification end-product balance in the closed-circuit grinding

Продукт	Выход, %	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %
Пенный продукт	4,8	17,20	41,28
Слив	95,2	1,23	58,72
Исходное питание	100,0	2,00	100,00

Результаты распределения меди по классам крупности слива флотоклассификации приведены в табл. 2.

Установлено, что использование флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения обеспечивает выход класса $-0,01$ мм 3,1 %. Массовая доля меди в нем составляет 0,6 % при извлечении в него меди 0,96 %.

Таблица 4. Условия эксперимента по флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения с обогащением пенного продукта в сужающемся желобе

Table 4. Experimental setting for flotation classification in the closed-circuit grinding with froth treatment in the tapered chute

Условия и показатели эксперимента	Режим флотоклассификации		
	1	2	3
Расход ксантогената, г/т	50	100	150
Расход вспенивателя Т-92, г/т	40	60	80

Сравнение результатов табл. 1 и табл. 2 показывает, что использование флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения приводит к снижению потерь меди в сливе с классом крупности $-0,01$ мм (со шламами) с 8,76 % без флотоклассификации до 0,96 % с флотоклассификацией.

В табл. 3 приведен баланс по конечным продуктам флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения.

Полученные результаты показывают, что использование процесса флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения обеспечивает за счет исключения переизмельчения медных минералов на медной руде Еленовского месторождения получение в пенном продукте кондиционного медного концентрата с массовой долей меди 17 % при извлечении в него меди 41 %.

Далее выполнено экспериментальное моделирование замкнутого цикла измельчения с флотоклассификацией, пенный продукт которой подвергается обогащению в сужающемся желобе. Целью данного эксперимента является определение возможностей получения в сливе флотоклассификации отвальных хвостов. Выполнено три эксперимента, в которых переменными факторами были расход ксантогената и расход вспенивателя Т-92. Условия эксперимента представлены в табл. 4.

Рис. 6. Результирующая технологическая схема проведения экспериментов по флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения с обогащением пенного продукта в сужающемся желобе

Fig. 6. Overall test flow chart of flotation classification in closed-circuit grinding with froth treatment in a tapered chute

Методика проведения эксперимента аналогична ранее приведенной.

Результирующая технологическая схема экспериментов приведена на рис. 6.

Результаты проведенных экспериментов в трех режимах приведены в табл. 5, 6, 7.

Эксперименты показали, что в режиме 3 при повышенных расходах ксантогената и вспенивателя в сливе флотоклассификатора были получены отвальные хвосты с массовой долей меди 0,13 % при потерях меди с хвостами 2,1 %. Установлена принципиальная возможность реализации технологии флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения с обогащением пенного продукта в сужающемся желобе, обеспечивающая получение в верхнем продукте сужающегося желоба кондиционного медного концентрата, в сливе флотоклассификатора – отвальных хвостов. При этом в нижнем продукте сужающегося желоба, который направляется на последующую флотацию, массовая доля меди по сравнению с массовой долей меди в исходном питании снизилась с 2,0 до 1,85 %, а выход питания последующей флотации снизился со 100 до 64 %.

Анализ и обсуждение результатов. Установлено, что измельчение в замкнутом цикле с гидравлической классификацией приводит к переизмельчению медных минералов. При выходе класса $-0,01$ мм 7,79 % массовая доля меди в нем составила 2,95 % при извлечении в него меди 8,76 %. Очевидно, что переизмельчение медных минералов приводит к повышению потерь меди с хвостами флотации.

Установлено, что использование флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения обеспечивает выход класса $-0,01$ мм 3,1 %. Массовая доля в нем составляет 0,6 % при извлечении в него меди 0,96 %, приводит к снижению потерь меди в сливе с классом крупности $-0,01$ мм (со шламами) с 8,76 % без флотоклассификации до 0,96 % с флотоклассификацией.

Таблица 5. Результаты эксперимента по флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения с обогащением пенного продукта в сужающемся желобе в режиме 1 (расход ксантогената – 50 г/т, расход вспенивателя – 40 г/т)

Table 5. Results of the experiment on flotation classification in the closed-circuit grinding with froth treatment in the tapered chute in mode 1 (xanthate consumption – 50 g/t, frother consumption – 40 g/t)

Продукт	Выход, %	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %
Верхний продукт сужающегося желоба	4,26	17,02	36,27
Нижний продукт сужающегося желоба	57,49	1,83	52,64
Слив флотоклассификации	38,25	0,58	11,09
Исходное питание	100,00	2,00	100,00

Таблица 6. Результаты эксперимента по флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения с обогащением пенного продукта в сужающемся желобе в режиме 2 (расход ксантогената – 100 г/т, расход вспенивателя – 60 г/т)

Table 6. Results of the experiment on flotation classification in the closed-circuit grinding with froth treatment in the tapered chute in mode 2 (xanthate consumption – 100 g/t, frother consumption – 60 g/t)

Продукт	Выход, %	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %
Верхний продукт сужающегося желоба	4,46	16,90	37,70
Нижний продукт сужающегося желоба	62,80	1,76	55,27
Слив флотоклассификации	32,73	0,43	7,03
Исходное питание	100,00	2,00	100,00

Таблица 7. Результаты эксперимента по флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения с обогащением пенного продукта в сужающемся желобе в режиме 3 (расход ксантогената – 150 г/т, расход вспенивателя – 80 г/т)

Table 7. Results of the experiment on flotation classification in the closed-circuit grinding with froth treatment in the tapered chute in mode 3 (xanthate consumption – 150 g/t, frother consumption – 80 g/t)

Продукт	Выход, %	Массовая доля меди, %	Извлечение меди, %
Верхний продукт сужающегося желоба	4,28	18,00	37,70
Нижний продукт сужающегося желоба	64,22	1,85	59,40
Слив флотоклассификации	31,50	0,13	2,00
Исходное питание	100,00	2,00	100,00

Полученные результаты показывают, что использование процесса флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения обеспечивает за счет исключения переизмельчения медных минералов на медной руде Еленовского месторождения получение в пенном продукте кондиционного медного концентрата с массовой долей меди 17 % при извлечении в него меди 41 %.

Использование флотоклассификации с обогащением пенного продукта в сужающемся желобе позволяет получить в верхнем продукте сужающегося желоба кон-

диционный медный концентрат с массовой долей меди 18 % при извлечении в него меди 37,7 %, отвальные хвосты в сливе флотоклассификатора с массовой долей меди 0,13 % при потерях меди с хвостами 2,1 % и нижний продукт сужающегося желоба с массовой долей меди 1,83 % при извлечении в него меди 57,49 %.

Область применения результатов. Результаты настоящей работы могут быть применены при совершенствовании технологии флотационного обогащения сульфидных руд путем внедрения флотоклассификации в замкнутый цикл измельчения.

Выводы. Полученные результаты имитации флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения раскрывают дополнительные возможности снижения переизмельчения сульфидных руд, получения кондиционного медного концентрата в пенном продукте, а также отвальных хвостов в сливе флотоклассификатора. Данная технология позволит существенно повысить технологические показатели обогащения, сократить фронт последующей флотации и снизить капитальные и эксплуатационные затраты в отделении флотации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бочаров В. А., Игнаткина В. А., Каюмов А. А. Теория и практика разделения минералов массивных упорных полиметаллических руд цветных металлов. М.: Горная книга, 2019. 510 с.
2. Алгебраистова Н. К., Кондратьева А. А. Технология обогащения руд цветных металлов. Электронный учебно-методический комплекс. 2009. URL: www.geokniga.org.
3. Chandramohan R., Holtham P. and Powell M. The influence of particle shape in rock fracture // XXV International Mineral Processing Congress IMPC. 2010. P. 3163–3171.
4. Бочаров В. А., Манцевич М. И., Скопов Е. В., Видуцкий М. Г., Захаров Б. А. Состояние, перспективы развития технологии глубокой и комплексной переработки руд цветных металлов // Горный журнал. 2007. № 2. С. 65–71.
5. Абрамов А. А. Флотационные методы обогащения. М.: МГГУ, 2017. 600 с.
6. Козин В. З. Исследование руд на обогатимость. Екатеринбург: УГГА, 2001. 142 с.
7. Olejnik Tomasz P. Grinding kinetics of selected minerals with reference to the number of contact points // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2006. No. 40. P. 247–254.
8. Jankovic A. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills // Minerals Engineering. 2003. No. 16. P. 337–345.
9. Tasdemir A., Ozdag H., Onal G. Image analysis of narrow size fractions obtained by sieve analysis – an evaluation by log-normal distribution and shape factors // Physicochemical Problems of Mineral Processing. 2011. No. 46. P. 95–106.
10. Norazirah A., Fuad S. H. S. and Hazizan M. H. M. The effect of size and shape on breakage characteristic of mineral // Procedia Chemistry. 2016. No. 19. P. 702–708. doi: 10.1016/j.proche.2016.03.073
11. Barrios G. K. P., de Carvalho R. M. and Tavares L. M. Extending breakage characterisation to fine sizes by impact on particle beds // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2011. No. 120. P. 37–44.
12. Хопунов Э. А. Селективное разрушение минерального и техногенного сырья (в обогащении и металлургии) // Екатеринбург: УИПЦ, 2013. 429 с.
13. Чантурия В. А., Шадрунова И. В., Горлова О. Е. Инновационные процессы глубокой и комплексной переработки техногенного сырья в условиях новых экономических вызовов // Эффективные технологии производства цветных, редких, благородных металлов: матер. Междунар. науч.-техн. конф. Алматы, 2018. С. 7–13.
14. Шадрунова И. В., Горлова О. Е., Колодежная Е. В. Принципы построения технологических линий переработки бедного природного и техногенного сырья с использованием центробежно-ударной техники // Эффективные технологии производства цветных, редких, благородных металлов: матер. Междунар. науч.-техн. конф. Алматы, 2018. С. 76–81.
15. Валиева О. С., Интогарова Т. И., Бекчурина Е. А., Морозов Ю. П. Преимущества применения флотоклассификаторов в замкнутом цикле измельчения // Горный журнал. 2019. № 2. С. 51–56.
16. Бекчурина Е. А., Интогарова Т. И., Абдыкирова Г. Ж. Предложение по реализации флотоклассификации в замкнутом цикле измельчения // Эффективные технологии производства цветных, редких и благородных металлов: матер. Междунар. науч.-техн. конф. Алматы, 2018. С. 76–81.
17. Бекчурина Е. А., Интогарова Т. И. Использование процесса вторичной концентрации минералов в пене для повышения технологических показателей флотоклассификации // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2017. С. 324–328.
18. Фалей Е. А., Колтунов А. В., Интогарова Т. И., Валиева О. С. Флотоклассификация с разделением пенного продукта в сужающемся желобе // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2016. С. 242–245.

Сведения об авторах:

Морозов Юрий Петрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых Уральского государственного горного университета. E-mail: tails2002@inbox.ru

Интогарова Татьяна Ивановна – старший преподаватель кафедры горного дела Политехнического института (филиал) Северо-Восточного федерального университета. E-mail: tatyana.intogarova@mail.ru

Валиева Ольга Сергеевна – старший преподаватель кафедры горного дела Политехнического института (филиал) Северо-Восточного федерального университета. E-mail: olga.valieva.80@mail.ru

Донец Юлия Олеговна – студентка кафедры горного дела Политехнического института (филиал) Северо-Восточного федерального университета. E-mail: yulad7126@gmail.com

DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-85-96

Flotation classification in closed-circuit grinding as a way of reducing sulphide ore overgrinding

Iurii P. Morozov¹, Tatiana I. Intogarova², Olga S. Valieva², Iuliia O. Donets²

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

² Mirny Polytechnic Institute (Branch) of North-Eastern Federal University, Mirny, Russia.

Abstract

Research object and aim. Flotation classification in closed-circuit grinding is a way of improving copper ore flotation indicators by reducing minerals overgrinding. Due to valuable components froth recovery with their uncovering in the process of grinding, loss of copper in flotation tailings with secondary slime are reduced significantly. The research aims to study the possibility to improve the flotation of copper ore based on the use of flotation classification in the closed-circuit grinding.

Methodology. In order to solve the problem, laboratory studies on closed-circuit grinding experimental modeling were carried out in a mode with and without flotation classification of hydraulic classification discharge. In each grinding mode, five stages of closed-cycle simulation have been implemented. Flotation classification was carried out in froth flotation modes with froth treatment with and without the tapered chute. According to experimental results, the loss of copper has been determined with slime in hydraulic classification discharge and flotation classification, and flotation classification end-product balance was calculated when operating in the closed-circuit grinding.

Summary. The obtained experimental data prove the possibility of improving copper ore flotation by reducing minerals overgrinding in the course of flotation classification in closed-circuit grinding. The technology of flotation classification with froth treatment in tapered chutes make it possible to obtain prime concentrate with 18% copper mass fraction when extracting 37.7% copper into it, and final tailings in flotation classification discharge with 0.13% copper mass fraction under 2% loss.

Key words: closed-circuit grinding; minerals overgrinding; flotation classification; tapered chutes; process parameters; recommendations.

REFERENCES

1. Bocharov V. A., Ignatkina V. A., Kaikumov A. A. *Theory and practice of separating the minerals of massive refractory polymetallic ore of non-ferrous metal*. Moscow: Gornaia kniga Publishing; 2019. (In Russ.)
2. Algebraistova N. K., Kondratieva A. A. *Technology of non-ferrous metal ore dressing*. Electronic teaching materials. 2009. Available from: www.geokniga.org
3. Chandramohan R., Holtham P. and Powell M. The influence of particle shape in rock fracture. *XXV International Mineral Processing Congress IMPC*. 2010. P. 3163–3171.
4. Bocharov V. A., Mantsevich M. I., Skopov E. V., Viduetskii M. G., Zakharov B. A. State and prospects of development of the technology for deep complex processing of non-ferrous ores. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2007; 2: 65–71. (In Russ.)
5. Abramov A. A. *Flotation methods of processing*. Moscow: MSMU Publishing; 2017. (In Russ.)
6. Kozin V. Z. *Ore metallurgical study*. Ekaterinburg: UrSMU Publishing; 2001. (In Russ.)
7. Olejnik Tomasz P. Grinding kinetics of selected minerals with reference to the number of contact points. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2006; 40: 247–254.
8. Jankovic A. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills. *Minerals Engineering*. 2003; 16: 337–345.
9. Tasdemir A., Ozdag H., Onal G. Image analysis of narrow size fractions obtained by sieve analysis – an evaluation by log-normal distribution and shape factors. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. 2011; 46: 95–106.
10. Norazirah A., Fuad S. H. S. and Hazizan M. H. M. The effect of size and shape on breakage characteristic of mineral. *Procedia Chemistry*. 2016; 19: 702–708. doi: 10.1016/j.proche.2016.03.073
11. Barrios G. K. P., de Carvalho R. M. and Tavares L. M. Extending breakage characterisation to fine sizes by impact on particle beds. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2011; 120: 37–44.

12. Khopunov E. A. *Selective disintegration of mineral and technogenic raw material (in processing and metallurgy)*. Ekaterinburg: UIPTs Publishing; 2013. (In Russ.)

13. Chanturiia V. A., Shadrinova I. V., Gorlova O. E. Innovative processes of deep and integrated processing of technogenic raw material in the conditions of new economic challenges. In: *Effective technologies of non-ferrous, rare, and precious metals production. Proceedings of International Scientific and Production Conference*. Almaty: KNRTU Publishing; 2018: 7–13. (In Russ.)

14. Shadrinova I. V., Gorlova O. E., Kolodezhnaia E. V. Strategy of processing lines construction of poor natural and technogenic raw material processing with the use of centrifugal impulse engineering. In: *Effective technologies of producing non-ferrous, rare, and precious metals: proc. of sci.-to-pract. conf.* Almaty; 2018. P. 76–81. (In Russ.)

15. Valieva O. S., Intogarova T. I., Bekchurina E. A., Morozov Iu. P. Advantages of applying flotation classification in closed grinding circuit. *Gornyi zhurnal = Mining Journal*. 2019; 2: 51–56. (In Russ.)

16. Bekchurina E. A., Intogarova T. I., Abdykairova G. Zh. Advantages of applying flotation classification in closed grinding circuit. In: *Effective technologies of producing non-ferrous, rare, and precious metals: proc. of sci.-to-pract. conf.* Almaty; 2018. P. 76–81. (In Russ.)

17. Bekchurina E. A., Intogarova T. I. Using the process of secondary concentration of minerals in froth to improve technological indicators of flotation classification. In: *Scientific basis and practice of ore and technogenic raw material processing: proc. of sci.-to-pract. conf.* Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset Publishing; 2017. P. 324–328. (In Russ.)

18. Falei E. A., Koltunov A. V., Intogarova T. I., Valieva O. S. Flotation classification with separation of froth product in the tapered chute. In: *Scientific basis and practice of ore and technogenic raw material processing: proc. of sci.-to-pract. conf.* Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset Publishing; 2016. P. 242–245. (In Russ.)

Received 9 November 2020

Information about authors:

Iurii P. Morozov – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Mineral Processing, Ural State Mining University. E-mail: tails2002@inbox.ru

Tatiana I. Intogarova – senior lecturer, Mining Department, Mirny Polytechnic Institute (Branch) of North-Eastern Federal University. E-mail: tatyana.intogarova@mail.ru

Olga S. Valieva – senior lecturer, Mining Department, Mirny Polytechnic Institute (Branch) of North-Eastern Federal University. E-mail: olga.valieva.80@mail.ru

Iuliia O. Donets – student, Mining Department, Mirny Polytechnic Institute (Branch) of North-Eastern Federal University. E-mail: yulad7126@gmail.com

Для цитирования: Морозов Ю. П., Интогарова Т. И., Валиева О. С., Донец Ю. О. Флотоклассификация в замкнутом цикле измельчения как один из способов снижения переизмельчения сульфидных руд // Известия вузов. Горный журнал. 2021. № 1. С. 85–96. DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-85-96

For citation: Morozov Iu. P., Intogarova T. I., Valieva O. S., Donets Iu. O. Flotation classification in closed-circuit grinding as a way of reducing sulphide ore overgrinding. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2021; 1: 85–96 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2021-1-85-96