

УДК 622.73; 622.74

**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ РАСКРЫТИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ
ПРИ ПОДГОТОВКЕ К ФЛОТАЦИОННОМУ ОБОГАЩЕНИЮ**

**С. В. Мамонов^{1,2}, В. Н. Закирничный¹, А. А. Метелев³,
Т. П. Дресвянкина¹, С. В. Волкова¹, В. А. Кузнецов³, С. В. Зиятдинов¹**

¹ОАО “Уралмеханобр”, E-mail: umbr@umbr.ru,

ул. Хохрякова, 87, 620063, г. Екатеринбург, Россия

²Технический университет УГМК, E-mail: zhrv@tu-ugmk.com,

просп. Успенский, 3, 624091, г. Верхняя Пышма, Россия

³ОАО “Святогор”, E-mail: svyatogor@svg.ru, ул. Мира, 2, 624330, г. Красноуральск, Россия

Приведены результаты изучения процесса измельчения минерального сырья и промежуточных продуктов его переработки в бисерных мельницах ультратонкого помола, мельницах тонкого помола Vertimill, гидроударно-кавитационных аппаратах (роторно-пульсационного типа). С помощью тонкого и ультратонкого измельчения достигается требуемая полнота раскрытия сростков сульфидных минералов друг с другом и вмещающими породами по сравнению с традиционным шаровым измельчением, а гидроударно-кавитационное измельчение повышает селективность вскрытия сростков при равенстве гранулометрического состава продуктов измельчения роторно-пульсационных аппаратов и шаровых мельниц. Исследована возможность улучшения качества руды перед глубоким обогащением при применении грохотов тонкого гидравлического вибрационного грохочения. Показано, что их использование в циклах рудоподготовки по сравнению с гидроциклонами позволяет снизить циркуляцию тонких классов крупности с надрешетным продуктом и потенциальное переизмельчение рудных минералов, а также повысить массовую долю классов крупности, оптимальных для последующего флотационного обогащения.

Технология, бисерная мельница, ультратонкое измельчение, мельница Vertimill, флотация, тонкое вибрационное гидравлическое грохочение, раскрытие минералов, извлечение, шлам

DOI: 10.15372/FTPRPI20190517

На процесс флотационного обогащения минерального и техногенного сырья в первую очередь влияет качество подготовки к переработке, связанное с полнотой раскрытия зерен полезного минерала из сростков с другими ценными минералами и пустой породой, а также с формированием благоприятного гранулометрического состава. В настоящее время подготовка сырья к флотационному обогащению на обогатительных фабриках осуществляется в горизонтальных барабанных мельницах само- и полусамоизмельчения, стержневых и шаровых, а выведение готового по крупности материала — в гидравлических классифицирующих аппаратах (механических классификаторах и гидроциклонах). Мельницы само- и полусамоизмельчения обеспечивают сокращение крупности руды с 400 до 0.075 мм, стержневые мельницы — с 50 до 0.6 мм, шаровые — с 15 до 0.020 мм [1].

Традиционные барабанные мельницы не дают необходимого раскрытия сростков ценных минералов друг с другом и вмещающими породами, за счет чего на обогатительных фабриках наблюдаются потери металлов с отвальными хвостами (рис. 1а) [1]. Более тонкий помол достигается на мельницах тонкого и ультратонкого измельчения типа Vertimill, SAM, SMD и т. д., когда сокращение крупности измельчаемого материала происходит с 2–6 до 0.002–0.005 мм [2, 3]. Практика обогащения руд показывает, что спиральные классификаторы используются в первых стадиях измельчения и демонстрируют эффективность классификации по классу –0.071 мм на уровне 50–60 %, гидроциклоны действуют в любой стадии измельчения с эффективностью классификации по классу –0.071 мм на уровне ~45 % (в редких случаях 75 %).

Применяемое на обогатительных фабриках классифицирующее оборудование с низкой эффективностью разделения приводит к увеличению циркуляции продуктивного класса крупности в замкнутом цикле измельчения, ошламованию минеральных частиц, возникновению тонкодисперсных шламов и потерям металлов с тонкими классами крупности отвальных хвостов (рис. 1б).

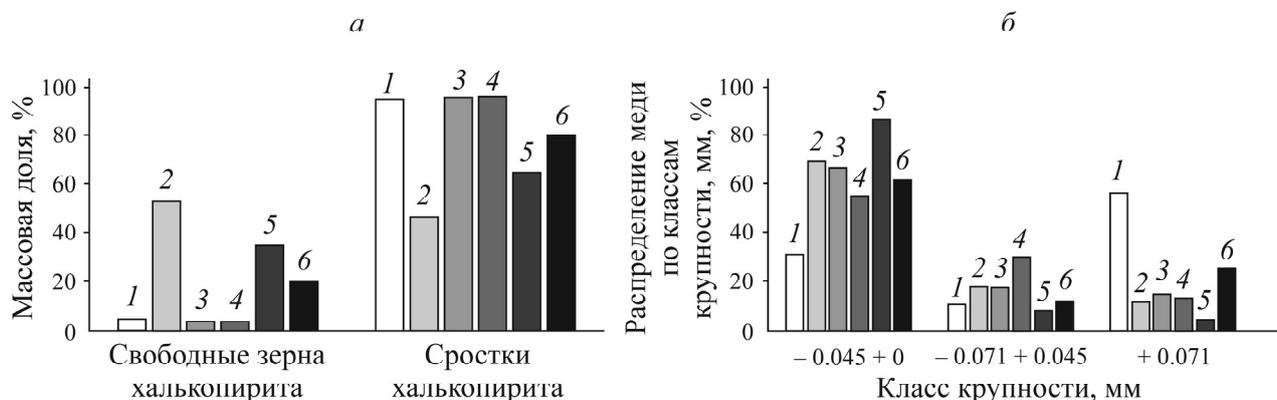


Рис. 1. Раскрытие халькопирита (а) и распределение меди по классам крупности (б) отвальных хвостов флотации различного сырья: 1, 5, 6 — Волковская, Октябрьская и Узельгинская руда; 2 — Ново-Шемурская медно-цинковая руда; 3 — конвертерные шлаки; 4 — Ново-Шемурская медная руда

Речь о шламах в процессе обогащения ведется с середины XX в., однако точного определения в литературе не приводится. В [4–6] за шлам принимаются частицы крупностью менее 0.01–0.05 мм, максимальная крупность 0.1 мм ($P_{80}=0.071$ мм). Исходя из этого, шлам во флотационном процессе — часть измельченного материала крупностью, отличающейся в 5 раз и более от номинальной крупности этого материала. В [7] указано, что при увеличении размера частиц свыше определенного, когда скорость флотации максимальна, достигается критический диаметр, при котором и выше частицы не смогут флотироваться. Критического размера для тонких частиц нет. При бисерном ультратонком измельчении получаемый класс крупности –0.02 мм рассматривается как машинный узкий класс, при шаровом традиционном измельчении — как шлам.

Для решения проблем неполного и неселективного раскрытия сростков ценных минералов, формирования оптимального гранулометрического состава обогащаемого материала, ошламования минеральных частиц и возникновения потерь металлов с хвостами обогащения интерес представляют технологии подготовки сырья к обогащению, основанные на ультратонком бисерном и гидроударно-кавитационном измельчении и тонком гидравлическом вибрационном грохочении.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследовании использовались следующие методы: анализ научно-технической информации; методы математической статистики и физического моделирования; лабораторные и промышленные испытания; ситовый и седиментационный анализы; оптическая микроскопия; количественный химический анализ; рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ. Гранулометрический анализ выполнялся на многочастотном ситовом анализаторе MSA-W/D-200 “Kroosh Technologies Ltd.”; дифракционном лазерном анализаторе размера частиц “Helos-KR” с приставками Quixel; аппарате дисперсионного анализа порошков. Минеральный состав руды и продуктов обогащения изучался с помощью оптического микроскопа Axio Imager A1m, автоматизированного анализатора “Минерал С7”. Рентгенофазовый анализ руды осуществлялся на волновом рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL PERFORM’X, а рентгеноструктурный анализ исходной руды — на рентгеновском дифрактометре порошковых материалов XRD-7000S. Массовые доли элементов и соединений в исходной руде и продуктах переработки измеряли в соответствии с Государственными стандартами и методиками РФ, применяя спектрометр эмиссионного с индуктивно связанной плазмой “Arcos”; атомно-абсорбционный спектрометр “Solaar”; анализатор серы “CS-800”; систему автоматического титрования “Titration Excellence T-70”; спектрофотометр, сканирующий “Specord 250 Plus”.

Технологические исследования выполнялись на современном лабораторном обогатительном оборудовании в составе: шаровая мельница МШЛ-7, мельница ультратонкого измельчения Knelson-Deswik серии KD-VGM2, аппарат лабораторный роторно-пульсационный, диспергатор поточный ИКА magic LAB, флотационные машины ФМП-Л3, ФМП-Л1 и ФМП-Л0.3, шкаф сушильный ШСП-0.258-500, пресс-фильтр КСРФ8, весы электронные GX-200 и GX-4000. Опытно-промышленные испытания проводились с помощью пилотной мельницы Vertimill, оснащенной собственным классифицирующим устройством и двумя гидроциклонами, а также пневмомеханических машин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ультратонкое и тонкое измельчение. Одно из перспективных направлений по достижению максимальной тонины помола сырья, для которого характерна тонкая и эмульсионная вкрапленность ценных минералов друг в друга и вмещающие породы, — ультратонкое бисерное (в бисерных мельницах) и тонкое (в мельницах Vertimill) измельчение [8]. Бисерные относятся к флюидизационным мельницам горизонтального типа, где мелющая среда и пульпа находятся во взвешенном состоянии. Материал, поступающий в бисерную мельницу, проходит последовательные стадии измельчения между дисками перед подачей на внутренний классификатор. Окружная скорость дисков достигает 12–22 м/с. Мельница работает при заполнении своего объема мелющими телами диаметром 1.5–6.0 мм. Традиционные шаровые мельницы используют циклоны, грохоты или классификаторы различного типа, а также замкнутый цикл с возвратом верхнего класса обратно в мельницу посредством перекачивающих аппаратов. В бисерной мельнице циркуляция происходит внутри аппарата и не требует внешнего классификатора, перекачки и циркуляции [2–4].

Лабораторные исследования влияния ультратонкого измельчения на технологические признаки обогащения проводились на пробе питания разделительной флотации медно-цинковой руды Ново-Шемурского месторождения, содержащей медь 6.86%, цинк — 7.85 и серу — 41.10%. Изучалась кинетика измельчения исследуемой пробы в шаровой МШЛ-7 и бисерной

KD-VGM2 мельницах с определением раскрытия сульфидных минералов. Результаты шарового измельчения показали, что при измельчении пробы до крупности 90% класса –0.071 мм (20–25% класса –0.02 мм) содержание раскрытых зерен халькопирита составляет 67%, вторичных медных минералов — 40, сфалерита — 66% (рис. 2).

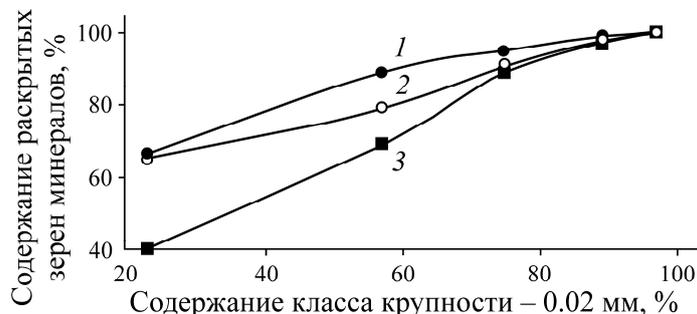


Рис. 2. Зависимость степени раскрытия халькопирита (1), вторичных медных минералов (2) и сфалерита (3) от содержания класса –0.02 мм в измельченном продукте

Приемлемое раскрытие ценных минералов (85–95% раскрытых зерен) наблюдалось при содержании класса крупности –0.02 мм на уровне 75% и достигалось при ультратонком измельчении пробы в бисерной мельнице, полное раскрытие сульфидов меди и цинка — при измельчении пробы в бисерной мельнице до крупности 92–97% класса –0.02 мм.

На исходной пробе питания разделительной флотации и продукте измельчения в бисерной мельнице до крупности 75% класса –0.02 мм осуществлялись флотационные исследования по схеме, предусматривающей проведение основной и контрольной медных флотаций с получением грубого медного концентрата, а также выполнение основной и контрольной цинковых флотаций на хвостах медного цикла с предварительной активацией цинковых минералов медным купоросом и получением грубого цинкового концентрата и хвостов цинковой флотации. В опытах реагентный режим принимался постоянным.

Установлено, что с увеличением в питании разделительной флотации содержания класса –0.02 мм с 25 до 75% наблюдается повышение извлечения меди в грубый медный концентрат на 2.17% при одновременном улучшении качества грубого медного концентрата на 2.93% (табл. 1). Извлечение цинка в грубый цинковый концентрат возрастает на 3.52% (с 76.00 до 79.52%). Сохраняется качество грубого цинкового концентрата, а потери с грубым медным концентратом снижаются на 3.26%.

ТАБЛИЦА 1. Технологические лабораторные показатели разделительной флотации с получением грубых медного и цинкового концентратов при вариации тонины помола, %

Концентрат	Выход	Массовая доля		Извлечение	
		Медь	Цинк	Медь	Цинк
25% класса –0.02 мм					
Грубый медный	48.14	11.99	3.24	90.75	20.71
Грубый цинковый	20.06	2.25	28.53	7.10	76.00
75% класса –0.02 мм					
Грубый медный	40.56	14.92	3.14	92.92	17.45
Грубый цинковый	26.93	1.25	27.52	5.18	79.52

В условиях Красноуральской обогатительной фабрики проводились опытно-промышленные испытания технологии тонкого измельчения питания разделительной флотации медно-цинковой руды Ново-Шемурского месторождения в мельнице Vertimill. Из потоков фабричных продуктов выделяли часть пульпы и измельчали в мельнице Vertimill производительностью 5–6 т/ч, работающей в замкнутом цикле с гидроциклонами. Экспериментальная разделительная флотация проходила во флотационных машинах ФПМ-3.2. Параллельно для оценки эффективности доизмельчения и возможности повышения технологических показателей осуществлялись флотационные сравнительные лабораторные опыты на пробах исходных и измельченных на опытной мельнице промпродуктов.

Результаты минералогического анализа показали, что в промышленных условиях питание разделительной флотации, измельченное в шаровых мельницах до крупности 20 % класса –0.02 мм (содержание класса –0.071 мм составляет 93–95 %), имеет невысокую степень раскрытия сульфидных минералов: массовая доля раскрытых зерен халькопирита и сфалерита 66–67 %, вторичных медных минералов — 40, пирита — 87 % (табл. 2). С увеличением тонины помола в процессе измельчения питания разделительной флотации в мельнице Vertimill возросла массовая доля раскрытых зерен сульфидных минералов. В процессе измельчения питания разделительной флотации с 20 до 60 % содержания класса –0.02 мм массовая доля раскрытых зерен халькопирита и сфалерита изменилась с 66 до 95–96 %, вторичных медных минералов — с 40 до 80 %, пирита — с 87 до 96 %.

ТАБЛИЦА 2. Массовая доля раскрытых зерен минералов в питании разделительной флотации, %

Минерал	Измельчение в мельнице		
	Шаровая	Vertimill	
	Содержание класса –0.02 мм в разгрузке мельниц		
	20	45	60
Халькопирит	66	94	96
Вторичные минералы меди	40	62	80
Сфалерит	67	93	95
Пирит	87	95	96

По совокупности результатов лабораторных и опытно-промышленных испытаний среднее извлечение меди и цинка в одноименные концентраты по технологии без тонкого измельчения (классическое шаровое измельчение) составляет 84.89 и 58.16 % соответственно, по технологии с тонким помолом руды в мельнице Vertimill — 86.70 и 64.82 %. Разница между извлечениями меди и цинка в концентраты по перспективной технологии с тонким измельчением и классической технологии с шаровым измельчением составляет соответственно 1.81 и 6.66 %.

Гидроударно-кавитационное измельчение. Одно из перспективных направлений, обеспечивающее селективность раскрытия минералов (освобождение минералов по границам срастания с сохранением исходного гранулометрического состава), — гидроударно-кавитационное измельчение сырья в соответствующих аппаратах [9]. Измельчение материала осуществляется с участием сил растяжения, играющих главную роль в раскрытии минерального сростка по границе спайности минералов [10].

Принцип работы гидроударно-кавитационного аппарата заключается в следующем: в момент перекрытия отверстий ротора и статора при прямом гидравлическом ударе резко повышается давление в среде, а частицы измельчаемого материала деформируются под действием сил сжатия. Возникают ударные волны, которые поглощаются и отражаются межзерновыми поверхностями, являющимися границами сростания минералов с различной проницаемостью. На границе сростания появляются напряжения, измельчаемый материал разупрочняется. В момент совпадения отверстий статора и ротора сжимающие усилия уменьшаются, частицы измельчаемого материала попадают в зазор и разрушаются под действием сил растяжения, происходящих на границе сростания минералов в момент исчезновения всестороннего сжатия, а также в результате проникновения в трещины приконтактной зоны минералов кумулятивных микроструек, образующихся при схлопывании кавитационных пузырьков [11, 12].

Проведены сравнительные лабораторные испытания процессов измельчения коллективного медно-цинкового концентрата с применением традиционной шаровой мельницы и гидроударно-кавитационного аппарата роторно-пульсационного типа. Коллективный концентрат содержал 90 % класса крупности -0.071 мм. Согласно данным минералогического анализа, халькопирит в исходном коллективном концентрате раскрыт на 72 %, сфалерит — 57, пирит — 86 % (рис. 3). Преобладают сростки халькопирита и сфалерита с пиритом. Часть зерен халькопирита и сфалерита находятся в сростках друг с другом и многокомпонентных пирит-халькопирит-сфалеритовых сростках. В тонком классе крупности $-0.024 + 0.012$ мм присутствуют раскрытые зерна халькопирита 92 %, сфалерита — 89 и пирита — 97 %. Полное раскрытие сульфидных минералов наблюдается в классе крупности менее 0.006 мм.

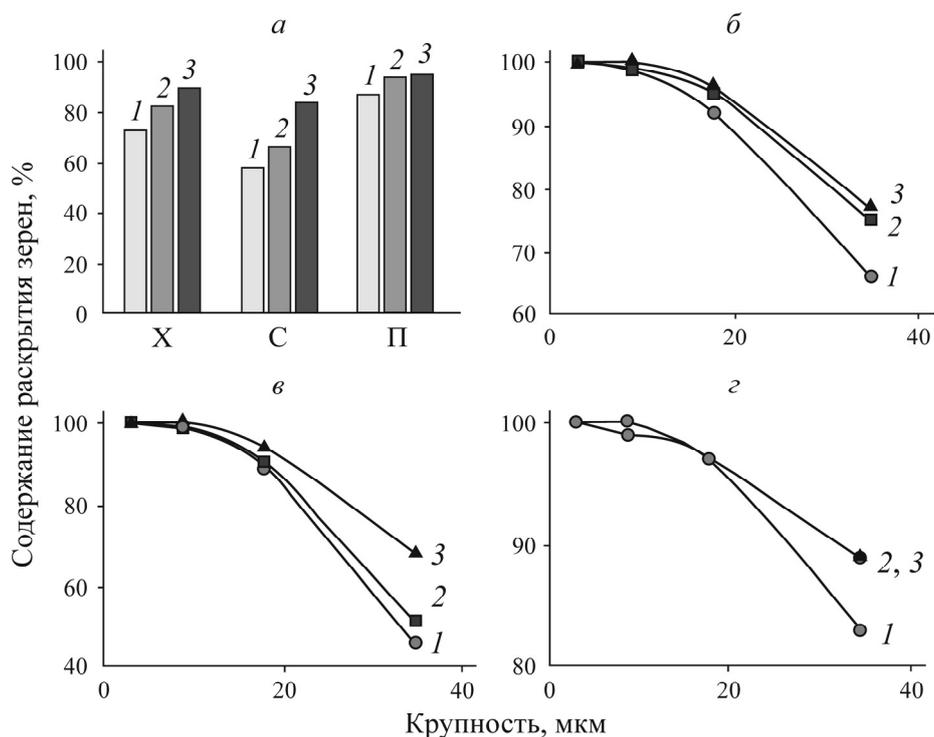


Рис. 3. Содержание раскрытых зерен: а — минералов в исходном коллективном концентрате и продуктах измельчения; б — халькопирита; в — сфалерита; г — пирита в классах крупности исследуемых продуктов. 1 — исходный коллективный концентрат крупностью 90 % класса -0.071 мм; 2, 3 — коллективный концентрат, измельченный в шаровой мельнице и гидроударно-кавитационном аппарате до крупности 95 % класса -0.045 мм; X — халькопирит; C — сфалерит; П — пирит

В результате шарового измельчения наблюдается раскрытие сульфидных минералов по показателям исходного коллективного концентрата. В коллективном концентрате, измельченном в шаровой мельнице до крупности 95 % класса -0.045 мм, содержание раскрытых зерен халькопирита составляет 82 %, сфалерита — 66, пирита — 93 %. Прирост содержания раскрытых зерен сульфидных минералов в продукте шарового измельчения по отношению к исходному продукту составил: халькопирита — 10 %, сфалерита — 9, пирита — 7 %. В классе крупности $-0.024 + 0.012$ мм присутствуют раскрытые зерна халькопирита 95 %, сфалерита — 90 и пирита — 97 %.

Введение в технологию обогащения коллективного медно-цинкового концентрата процесса гидроударно-кавитационного измельчения увеличивает степень раскрытия сульфидных минералов по сравнению с шаровым измельчением при одинаковом 95 % содержании класса крупности -0.045 мм в продукте измельчения. Массовая доля раскрытых зерен халькопирита повысилась до 89 %, что на 7 % выше аналогичного показателя исходного продукта, измельченного в шаровой мельнице. Прирост содержания раскрытых зерен халькопирита в продукте роторно-пульсационных аппаратов по отношению к исходному продукту и измельченному в шаровой мельнице составил 17 и 10 % соответственно, а у цинковой обманки в продукте гидроударно-кавитационного измельчения — 26 и 17 %. У сфалерита массовая доля раскрытых зерен в продукте роторно-пульсационных аппаратов возрастает до 83 %.

В классе крупности $-0.024 + 0.012$ мм продукта измельчения роторно-пульсационных аппаратов сульфидные минералы раскрыты полностью. Для относительно твердых и крепких минералов, к которым относится пирит, гидроударно-кавитационное измельчение не влияет на избирательность разрушения. Прирост содержания раскрытых зерен серного колчедана в продукте гидроударно-кавитационного измельчения по отношению к продукту измельчения шаровой мельницы составил 1 %.

На продуктах измельчения шаровой мельницы и роторно-пульсационных аппаратов выполнены сравнительные флотационные исследования по схеме, предусматривающей получение грубого медного концентрата и хвостов цикла медной флотации, при постоянном реагентном режиме. Применение в технологии обогащения медно-цинковых руд процесса гидроударно-кавитационного измельчения способствует повышению технологических показателей обогащения по сравнению с традиционным шаровым измельчением: содержание меди в грубом медном концентрате возрастает на 0.65 % при одновременном увеличении извлечения на 0.84 % (табл. 3). Снижаются потери цинка с грубым медным концентратом на 9.21 % при одновременном снижении содержания на 0.75 %.

Тонкое гидравлическое вибрационное грохочение. Повысить эффективность работы циклов измельчения и классификации руды, стабилизировать флотацию, улучшить технологические показатели обогащения за счет снижения переизмельчения минеральных частиц возможно путем внедрения эффективного классифицирующего оборудования — грохотов тонкого гидравлического вибрационного грохочения [13–15], а также совершенствования раскрытия минеральных сростков [16, 17].

В табл. 3 приведены сравнительные исследования процессов тонкого гидравлического вибрационного грохочения и гидроциклонирования в замкнутых циклах измельчения медно-цинковой руды. По результатам грохочения и гидроциклонирования медно-цинковой руды в замкнутом цикле получены подрешетный продукт и слив с массовой долей класса крупности -0.071 мм 90.42 и 90.07 % соответственно.

ТАБЛИЦА 3. Результаты флотационных исследований коллективного концентрата и продуктов измельчения в шаровой мельнице и гидроударно-кавитационном аппарате, %

Продукт обогащения	Выход	Массовая доля		Извлечение	
		Медь	Цинк	Медь	Цинк
Исходный коллективный концентрат					
Грубый медный концентрат	53.60	11.84	4.57	93.46	49.49
Хвосты медной флотации	46.40	0.96	5.28	6.54	50.01
Измельчение коллективного концентрата в шаровой мельнице до крупности 95 % класса –0.045 мм					
Грубый медный концентрат	50.23	12.76	4.37	94.37	44.83
Хвосты медной флотации	49.77	0.77	5.43	5.63	55.17
Измельчение коллективного концентрата в гидроударно-кавитационном аппарате до крупности 95 % класса –0.045 мм					
Грубый медный концентрат	48.21	13.41	3.62	95.21	35.62
Хвосты медной флотации	51.79	0.63	6.09	4.79	64.38

Применение тонкого гидравлического вибрационного грохочения в замкнутых циклах измельчения повышает в конечном продукте цикла массовую долю частиц флотационной крупности на 11 % и более за счет снижения на 9 % массовой доли тонких и на 2.5 % крупных фракций (рис. 4). С увеличением выхода класса крупности –0.02 мм в слив растет извлечение меди и цинка в него на 4.7 и 6.1 % соответственно по сравнению с аналогичным показателем подрешетного продукта. Во время флотационного обогащения данный класс крупности может частично или полностью потеряться с отвальными хвостами.

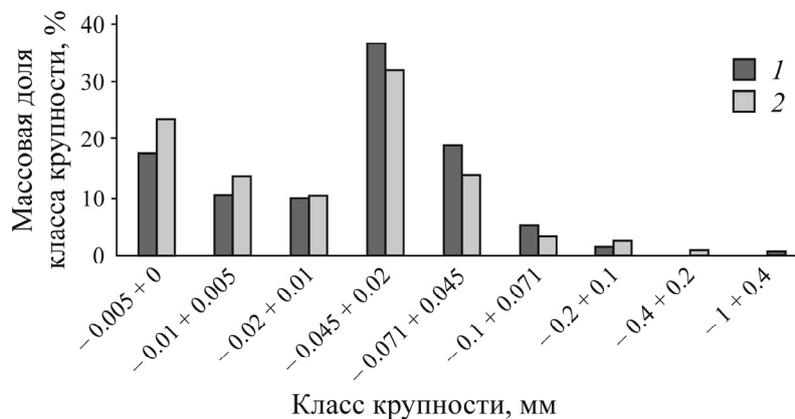


Рис. 4. Гранулометрический состав подрешетного продукта грохота (1) и слива гидроциклона (2)

Из результатов минералогического анализа конечных продуктов цикла следует, что при использовании в замкнутом цикле измельчения медно-цинковой руды процесса грохочения снижается переизмельчение раскрытых зерен минеральных частиц, т. е. в 1.5–2.0 раза уменьшается массовая доля раскрытых зерен минералов крупностью менее 0.02 мм (табл. 4). Массовая доля раскрытых зерен минералов флотационной крупности в подрешетном продукте, наоборот, возрастает на 3–12 %. Повышение массовой доли раскрытых зерен минералов флотационной крупности происходит с одновременным увеличением их извлечения в конечный продукт замкнутого цикла в случае применения тонкого грохочения. Прирост извлечения раскрытых зерен минералов флотационной крупности в конечный продукт цикла с грохотом составляет 2–12 %.

ТАБЛИЦА 4. Распределение раскрытых зерен минералов по крупности в продуктах классификации, %

Продукт	Крупность, мм	Распределение раскрытых зерен минералов			
		Халькопирит	Сфалерит	Пирит	Нерудные минералы
Подрешетный продукт грохота	0.07–0.15	15.1	12.6	39.3	25.3
	0.04–0.07	58.9	60.0	33.3	48.1
	0.02–0.04	22.2	22.6	19.6	23.7
	0.01–0.02	3.2	4.1	5.1	2.7
	0.00–0.01	0.6	0.7	2.7	0.2
Слив гидроциклона	0.15–0.20	—	—	—	12.2
	0.07–0.15	21.3	15.3	38.1	18.2
	0.04–0.07	44.9	56.6	25.9	45.8
	0.02–0.04	27.3	18.1	24.2	20.3
	0.01–0.02	5.2	6.2	7.6	3.0
	0.00–0.01	1.3	3.8	4.2	0.5

Доля раскрытых зерен основных минералов, приходящихся на флотационный класс крупности, на 8–10 % выше в подрешетном продукте грохота, чем в сливе гидроциклона (табл. 5). Равенству массовых долей раскрытых ценных минералов в подрешетном продукте и сливе способствует увеличение в последнем массовой доли тонких классов крупности, в которых они полностью раскрыты.

Проведена оценка влияния качества подготовки медно-цинковой руды в замкнутых циклах измельчения, основанных на применении грохота тонкого гидравлического вибрационного грохочения и гидроциклона, на результаты флотационного обогащения. По итогам исследования кинетики флотации установлено, что при флотационном обогащении подрешетного продукта грохота скорость флотации медь- и цинксодержащих минералов выше. Коэффициент удельной скорости флотации медь- и цинксодержащих минералов подрешетного продукта грохота на 10–20 % выше аналогичных показателей слива.

Флотационные исследования, проведенные в замкнутом цикле по принципу непрерывного технологического процесса с использованием оборотной воды по единому технологическому и реагентному режиму, при одинаковой массовой доле класса крупности –0.071 мм в питании флотации, равной 90 %, продемонстрировали, что во время флотации подрешетного продукта грохота по сравнению со сливом гидроциклона увеличивается:

- массовая доля меди и цинка в одноименных концентратах более чем на 2 и 4 % соответственно;
- извлечение меди и цинка в одноименные концентраты более чем на 2 и 4 % соответственно при снижении потерь меди и цинка с разноименными концентратами более чем на 3 и 1 % соответственно, а также потерь меди и цинка с отвальными хвостами более чем на 1.5 и 1.0 % соответственно.

Прирост потерь меди и цинка с отвальными хвостами и разноименными концентратами при флотации слива по сравнению с аналогичными результатами флотации подрешетного продукта грохота связан с избыточным ошламованием минералов исследуемой медно-цинковой руды, а также переходом ценных металлов в тонкие шламистые классы крупности, обладающие низкой флотационной способностью.

ТАБЛИЦА 5. Распределение раскрытых зерен минералов по классам крупности продуктов разделения, %

Продукт / минерал	Показатель, %	Класс крупности, мм				
		0–0.02	0.02–0.045	0.045–0.071	0.071–0.15	Итого
Подрешетный продукт Слив	Выход класса крупности	37.81	36.71	18.87	6.61	100.0
		47.32	32.04	13.67	6.97	100.0
Халькопирит	Подрешетный продукт					
	Массовая доля раскрытых зерен	100.0	95.0	74.0	61.0	90.7
	Доля раскрытых зерен в классе крупности	37.8	34.9	14.0	4.0	90.7
	Слив					
	Массовая доля раскрытых зерен	100.0	95.0	80.0	52.0	92.3
	Доля раскрытых зерен в классе крупности	47.3	30.5	10.9	3.6	92.3
Сфалерит	Подрешетный продукт					
	Массовая доля раскрытых зерен	100.0	92.0	83.0	74.0	92.2
	Доля раскрытых зерен в классе крупности	37.8	33.8	15.7	4.9	92.2
	Слив					
	Массовая доля раскрытых зерен	100.0	95.0	86.0	52.0	92.9
	Доля раскрытых зерен в классе крупности	47.3	30.4	11.6	3.6	92.9
Пирит	Подрешетный продукт					
	Массовая доля раскрытых зерен	100.0	98.0	95.0	88.0	97.5
	Доля раскрытых зерен в классе крупности	37.8	36.0	17.9	5.8	97.5
	Слив					
	Массовая доля раскрытых зерен	100.0	99.0	98.0	87.0	98.4
	Доля раскрытых зерен в классе крупности	47.3	31.7	13.3	6.1	98.4
Нерудные минералы	Подрешетный продукт					
	Массовая доля раскрытых зерен	100.0	99.0	98.0	94.0	98.8
	Доля раскрытых зерен в классе крупности	37.8	36.3	18.5	6.2	98.8
	Слив					
	Массовая доля раскрытых зерен	100.0	99.0	98.0	91.0	98.7
	Доля раскрытых зерен в классе крупности	47.3	31.7	13.4	6.3	98.7

ВЫВОДЫ

Ультратонкое бисерное измельчение и измельчение в мельницах Vertimill питания разделительной флотации до крупности 60 % класса –0.02 мм повышает массовую долю раскрытых зерен халькопирита и сфалерита с 66 до 96 %, вторичных медных минералов — с 40 до 80 %, пирита — с 87 до 96 %. Такая подготовка обеспечивает прирост извлечения меди и цинка в концентраты на 1.81 и 6.66 %.

Гидроударно-кавитационное измельчение минерального сырья по сравнению с измельчением в шаровых мельницах улучшает качество измельченного материала перед флотацией за счет увеличения доли раскрытых зерен. На примере медно-цинковых руд установлен рост содержания и извлечения меди в грубом медном концентрате при одновременном снижении потерь цинка на 9.21 %.

Тонкое вибрационное грохочение по сравнению с гидроциклонами позволяет повысить на 8–10% долю раскрытых основных минералов при подготовке к флотации медно-цинковых руд. Флотационные исследования в замкнутом цикле подтвердили улучшение технологических показателей. Прирост извлечения и содержания меди и цинка в одноименные концентраты составил 2 и 4 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чантурия В. А., Чаплыгин Н. Н., Вигдергауз В. Е.** Ресурсосберегающие технологии переработки минерального сырья и охрана окружающей среды // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья / под ред. В. А. Чантурия. — М.: Руда и металлы, 2008. — 283 с.
2. **Газалеева Г. И.** Теория, технология и техника процессов измельчения минерального сырья. — Екатеринбург: АМБ, 2017. — 352 с.
3. **Седельникова Г. В., Романчук А. И.** Эффективные технологии извлечения золота из руд и концентратов // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья / под ред. В. А. Чантурия. — М.: Руда и металлы, 2008. — 283 с.
4. **Барский Л. А., Данильченко Л. М.** Обогащаемость минеральных комплексов. — М.: Недра, 1977. — 240 с.
5. **Классен В. И., Недоговоров Д. И., Дебердеев И. Х.** Шламы во флотационном процессе. — М.: Недра, 1969. — 160 с.
6. **Классен В. И., Мокроусов В. А.** Введение в теорию флотации. — М.: Metallurgizdat, 1953. — 463 с.
7. **Митрофанов С. И.** Селективная флотация. — М.: Metallurgizdat, 1958. — 726 с.
8. **Технология обогащения** медных и медно-цинковых руд Урала / под общ. В. А. Чантурия, И. В. Шадруновой. — М.: Наука, 2016. — 387 с.
9. **Аснис Н. А., Борткевич С. В., Ваграмян Т. А., Глинкин В. А., Калинкина А. А.** Исследование влияния волновой обработки пульпы на процесс флотационного обогащения медных сульфидных руд и промежуточных продуктов их переработки // Цв. металлы. — 2011. — № 10. — С. 42–45.
10. **Хопунов Э. А.** Селективное разрушение минерального и техногенного сырья (в обогащении и металлургии). — Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. — 429 с.
11. **Скворцов Л. С., Сердюк Б. П.** Перспективы применения кавитационного гидродинамического реактора для утилизации отходов горнодобывающей промышленности // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды конгресса с международным участием и конференции молодых ученых. — Екатеринбург: УрО РАН. — С. 91–94.
12. **Мещеряков И. В.** Разработка и исследование многоступенчатого гидроударно-кавитационного устройства для мелкодисперсного измельчения труднообогащаемых руд: дис. ... канд. техн. наук, 2014. — 209 с.

- 13. Мамонов С. В., Мушкетов А. А., Нечунаев А. А.** Флотация медных руд при использовании в рудоподготовительном цикле тонкого вибрационного грохочения // Горн. журн. — 2013. — № 3. — С. 114–120.
- 14. Цыпин Е. Ф., Мамонов С. В., Власов И. А.** Продукты классификации и тонкого грохочения замкнутого цикла измельчения медно-цинковой руды // Цв. металлургия. — 2016. — № 2. — С. 4–11.
- 15. Ismagilov R. I., Kozub A. V., and Sharkovsky D. O.** Cutting-edge technological solution enabling competitive advantages of iron-ore concentrate produced by PJSC Mikhailovsky GOK, Abstract book XXIX Int. Mineral Proc. Congress, 17–21 September 2018, Moscow. — 1029 p.
- 16. Юсупов Т. С.** Совершенствование процессов раскрытия минеральных сростков при освоении труднообогатимых объектов // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 143–149.
- 17. Уракаев Ф. Х., Юсупов Т. С.** Численная оценка кинематических и динамических характеристик обработки минералов в дезинтеграторе // ФТПРПИ. — 2017. — № 1. — С. 135–142.

Поступила в редакцию 8/VII 2019

После доработки 8/VII 2019

Принята к публикации 23/IX 2019