

УДК 622.7

DOI: 10.15372/KhUR20170413

## Совершенствование флотационного обогащения медно-никелевых руд на основе селективного разрушения минеральных сростков высокоэнергетическими ударными воздействиями

Т. С. ЮСУПОВ<sup>1</sup>, Е. А. КИРИЛЛОВА<sup>1</sup>, Л. Г. ШУМСКАЯ<sup>1</sup>, В. П. ИСУПОВ<sup>2</sup>, Н. З. ЛЯХОВ<sup>2</sup><sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: yusupov@igm.nsc.ru

<sup>2</sup>Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: isupov@solid.nsc.ru

(Поступила 15.09.16; после доработки 11.01.17)

### Аннотация

Обоснованы факторы и причины трудной обогатимости тонко вкрапленной медно-никелевой руды, главные из которых – неполное и недостаточно селективное раскрытие сростков сульфидных и породообразующих минералов ввиду низких механических взаимодействий в шаровых мельницах. В результате значительная часть цветных и благородных металлов переходит в отходы обогатительного производства, пополняя техногенные скопления. Исследованы технологические возможности высокоэнергетического и высокоскоростного ударного измельчения в дезинтеграторе, в котором увеличенные разрушающие воздействия способствуют более селективному раскрытию сростков. Возможность регулирования энергией и скоростью свободного удара позволяет проводить разрушение, главным образом, по границам минеральных сростаний и снизить количество тонких, шламовых фракций в продуктах измельчения. Однако, как показали результаты экспериментов, повышение скорости дезинтеграции до 7200 об/мин не привело к образованию продуктов флотационной крупности  $-0.071+0.02$  мм; значительная часть руды остается в более крупном, труднофлотируемом состоянии. С целью оптимизации раскрытия минеральных ассоциаций по гранулометрическому составу предложен принцип стадийного измельчения, позволяющий последовательно, в режимах возрастающих энергетических воздействий, доизмельчать более крупные фракции руды и освобождать минералы из генетических ассоциаций повышенной прочности. При подобном подходе в оптимальных скоростных режимах удалось селективно разрушить сульфидные минералы и получить при флотационном разделении концентраты с повышенным содержанием цветных металлов, что открывает возможности для совершенствования металлургических методов переработки концентратов. Более высокоэнергетическое разрушение способствует освобождению остаточных количеств сульфидов из породных ассоциаций и переводу в хвосты обогащения до 50 % породной части руды. Необходимо отметить, что при этом раскрывается значительная часть соединений никеля, находящихся в сростках с породными образованиями, что важно в плане повышения извлечения никеля в концентраты. Выполненные исследования показывают, что высокоэнергетическое ударное измельчение представляет собой передовой метод селективного разрушения сростков и освобождения минералов в тонко вкрапленных рудах перед обогатительными процессами.

**Ключевые слова:** флотационное обогащение, медно-никелевые руды, разрушение сростков, ударное воздействие

### ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на значительные достижения в создании прогрессивных процессов и оборудо-

вания для рудоподготовки и минераллургии труднообогатимого минерального сырья, обогащение ряда генетических типов руд, особенно с тонко вкрапленной минерализацией,

характеризуется значительным недоизвлечением ценных компонентов и их потерями в сродках с порообразующими минералами и со шламовыми продуктами, что имеет место при традиционном измельчении в барабанных мельницах [1, 2]. Примером изложенного служит обогащение тонко вкрапленных медно-никелевых руд Норильских месторождений. Так, на Талнахской обогатительной фабрике отходы флотации содержат 0.62 % Ni и 0.13 % Cu, а в хвостохранилище “Лебяжье” количество металлов платиновой группы достигает 1.5 г/т [3]. Исходные руды с такими показателями по содержанию металлов интересны как объекты для их извлечения.

В связи с ужесточением экологических требований разрабатываются решения по выделению концентратов повышенного качества по содержанию никеля, что позволит сократить поступление серы в пирометаллургический процесс [4].

Однако при этом возникает серьезная проблема по доизвлечению из хвостов обогащения никеля в виде малосернистых продуктов. Ее решение в значительной мере определя-

ется освобождением сульфидов из состояния взаимного срастания. При раскрытии сродков механическими воздействиями важна минимизация дефектообразования в кристаллической структуре поверхности минералов, т. е. реализация селективного, малодефектного измельчения. Это позволит сохранить различия в смачиваемости минералов при их флотационном разделении.

В настоящей работе проанализированы возможности высокоскоростного и высокоэнергетического разрушения руд в дезинтеграторе со свободным ударом, эффективность которого показана на примере ряда руд и техногенного сырья [5–8], но применительно к тонко вкрапленным и частично эмульсионным взаимопрорастаниям геоматериалов подобное разрушение еще слабо исследовано.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом изучения выбраны медно-никелевые руды рудника “Маяк”, который позднее

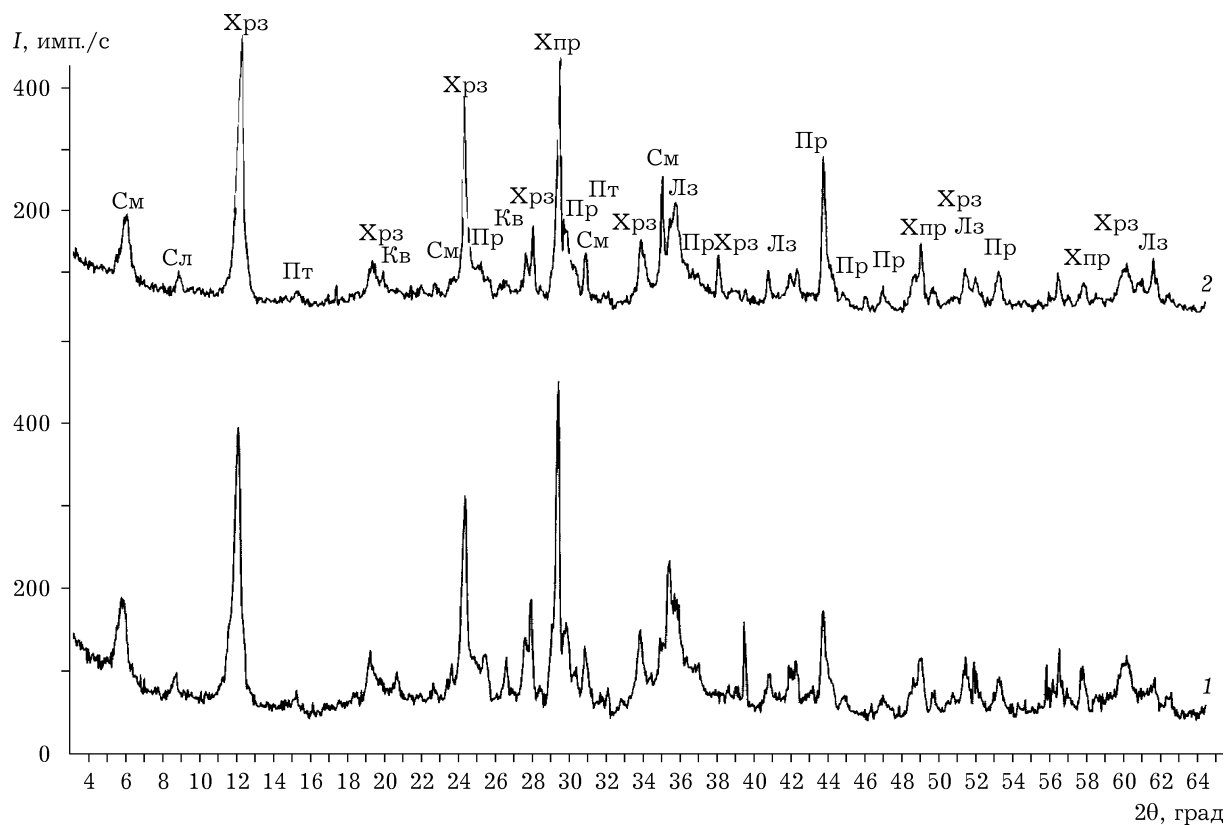


Рис. 1. Рентгенограммы (а) исходной и (б) измельченной в дезинтеграторе при 2400 об/мин проб. Обозначения: Хрз – Хризотил, Лз – Лizardит, См – Сметит, Хпр – Халькопирит, Пр – Пирротин, Сл – Слюда, Кв – кварц, Пт – пентландит.

вошел в структуру шахты “Комсомольская” (Норильский район). Химический состав пробы, определенный методом атомной абсорбции на приборе Varian AA 280 FS, следующий, %: Ni 1.17, Cu 1.92, Fe 17.33. Согласно данным рентгенофазового анализа (РФА ИГМСО РАН, прибор Дрон-4,  $CuK_{\alpha}$ -излучение), рудные минералы представлены пирротинном  $Fe_{1-x}S$ , халькопиритом  $CuFeS_2$  и пентландитом  $(Fe,Ni)_9S_8$ , суммарное содержание которых составляет 10–12 %. Согласно исследованиям института “Механобр” (С.-Петербург), в очень небольших количествах присутствуют сфалерит  $ZnS$ , макиновит  $Fe_{1-x}S$ , джерфшерит  $K_3CuFe_{12}S_{14}$  и пирит  $FeS_2$  [9]. В состав породообразующих минералов входят хризотил  $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$ , лизардит  $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$ , смектит, слюды, полевые шпаты и кварц, их суммарное содержание достигает 70 % (рис. 1).

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ**

Тонкое взаимопрораствание рудных образований объясняет тот факт, что даже такие легкие минералы, как кварц и полевые шпаты, при разделении в  $CHBr_3$  с плотностью менее  $2.89 \text{ г/см}^3$  частично переходят в тяжелую

ТАБЛИЦА 1

Результаты измельчения пробы при различной интенсивности дезинтеграции

Класс крупности, мм	Частота вращения роторов, об/мин		
	2400	3600	7200
	Выход фракции, %		
+0.071	79.6	71.4	38.1
-0.071+0.02	13.3	20.9	40.6
-0.02	7.1	7.7	21.3
Всего	100.0	100.0	100.0

ТАБЛИЦА 2

Результаты доизмельчения пробы (фракция +0.071 мм) при различной интенсивности дезинтеграции

Класс крупности, мм	Частота вращения роторов, об/мин	
	3600	7200
	Выход фракции, %	
+0.071	56.8	21.6
-0.071+0.02	16.6	23.1
-0.02	6.1	12.1
Всего	79.5	56.8

фракцию, а в легкой части разделения установлены халькопирит и пирротин.

Ударное измельчение в дезинтеграторе (прибор DEZI-11) приводит к разрушению основной части сростков (см. рис. 1); в легком продукте при аналогичном разделении возрастает количество хризотила и смектита. Кроме того, данный метод позволяет регулировать скорость и величину энергии свободного удара. При использовании барабанной мельницы значимых различий в соотношениях минералов по плотностной градации не наблюдается.

Эффективность раскрытия минералов оценивалась по результативности флотационного обогащения как наиболее широко используемого метода концентрирования минералов, особенно сульфидных. Дезинтеграторное разрушение проводилось в сухом режиме, перспективность применения которого отмечалась в [10].

Изучались особенности разрушения исследуемой руды при скорости вращения роторов дезинтегратора 2400, 3600 и 7200 об/мин. Гранулометрический состав диспергированных продуктов показывает, что с повышением числа оборотов роторов и скорости свободного удара дисперсность повышается, растет выход флотационных классов  $-0.071 \text{ мм}$  и  $-0.02 \text{ мм}$  (табл. 1). Однако в результате однократного прохождения одинаковых проб через дезинтегратор остается высокой доля класса  $+0.071 \text{ мм}$ , в котором сростки в нужной мере еще не раскрыты, и даже при скорости вращения роторов 7200 об/мин она составляет 38.1 %. Также отмечается повышенный выход трудно поддающегося флотационной селекции класса  $-0.02 \text{ мм}$ .

В большей мере оптимальный гранулометрический состав для разделения флотацией обеспечивается последовательным доизмельчением крупных фракций до размеров  $-0.071 \text{ мм}$  при переходе к повышенной интенсивности разрушения, особенно при 7200 об/мин (табл. 2).

Анализ гранулометрического состава продуктов дезинтеграции показал, что требованиям флотационного процесса в наибольшей мере отвечает процесс, который ведется при максимальной скорости ударного разрушения, однако перед обогащением весь продукт целесообразно измельчать до класса крупности менее  $0.071 \text{ мм}$ . При флотации в качестве собирателя использовался бутиловый ксантоген-

ТАБЛИЦА 3

Флотация сульфидов фракции  $-0.071+0$  мм, полученных одноразовым полным измельчением пробы в дезинтеграторе (частота вращения роторов 7200 об/мин)

Характеристика продукта	Выход, %	Химический состав, %			Извлечение, %		
		Cu	Ni	Fe	Cu	Ni	Fe
Пенный, коллективный концентрат	23.4	8.14	2.38	23.35	89.5	39.5	26.8
Камерный, хвосты	76.6	0.29	0.84	19.45	10.5	60.5	73.2
Исходный	100.0	2.12	1.20	20.36	100.0	100.0	100.0

нат  $C_4H_9OCSSK$  (200 г/т), а вспенивателем служила смесь моноэфиров полипропиленгликолей в количестве 100 г/т. Кислотность среды регулировалась добавлением серной кислоты до  $pH \sim 4.5$ . В результате обогащения получен коллективный концентрат сульфидных минералов и хвосты процесса, которые анализировались на содержание Cu, Ni и Fe (табл. 3). В выбранном режиме наиболее активно флотируются халькопирит и пирротин, извлечение меди в концентрат (пенный продукт) достигает 89.5 % при почти четырехкратном его возрастании по сравнению с существующим, что в технологии обогащения считается вполне удовлетворительным показателем. Извлечение никеля происходит в основном за счет флотации пентландита и достигает всего 39.5 %, его содержание в концентрате уве-

личилось лишь в два раза. Подобные низкие показатели связаны с тем, что никель в данной руде находится в трех формах – тонко вкрапленной сульфидной (в основном в виде пентландита), эмульсионной (главным образом, в пирротине) и силикатной, на долю которой приходится до 20–25 % металла от общего его содержания в руде. Никель входит в решетку силикатов и при флотации извлекается лишь в количестве 3–5 % от его содержания в силикатной форме. Более интенсивное извлечение достигается специальными механическими и механохимическими воздействиями и другими методами.

С целью установления наиболее оптимальных режимов раскрытия сростков, позволяющих выделять концентраты с более высоким содержанием цветных металлов, анализиро-

ТАБЛИЦА 4

Изменения химического состава руды в процессе измельчения

Аппарат измельчения, режим	Крупность фракции, мм	Выход фракции, %	Химический состав, %			Извлечение, %		
			Медь	Никель	Железо	Медь	Никель	Железо
Стержневая мельница	+0.071	91.1	2.39	1.12	16.39	91.27	89.37	91.20
	-0.071+0.02	5.6	2.18	1.34	16.35	5.11	6.55	5.59
	-0.02	3.3	2.62	1.41	16.21	3.62	4.08	3.81
	Всего	100.0	2.38	1.14	16.37	100.0	100.0	100.0
Дезинтегратор, 2400 об/мин	+0.071	72.6	2.12	1.08	14.81	70.99	71.62	76.29
	-0.071+0.02	12.1	3.63	1.78	19.63	20.38	19.66	16.82
	-0.02	6.4	2.91	1.49	14.84	8.63	8.72	6.89
	Всего	91.1	2.36	1.20	14.09	100.0	100.0	100.0
Дезинтегратор, 3600 об/мин	+0.071	51.8	0.93	0.69	11.11	36.35	48.91	58.64
	-0.071+0.02	15.2	3.94	1.69	20.20	45.16	35.14	31.28
	-0.02	5.6	4.38	2.08	17.64	18.49	15.95	10.08
	Всего	72.6	1.56	1.00	13.51	100.0	100.0	100.0
Дезинтегратор, 7200 об/мин	+0.071	19.7	0.34	0.35	9.88	10.14	15.40	28.11
	-0.071+0.02	21.0	1.09	0.87	14.50	35.75	40.88	43.39
	-0.02	11.1	3.12	1.76	17.78	54.22	43.72	28.50
	Всего	51.8	1.23	0.86	13.35	100.0	100.0	100.0

вались фракции руды различной крупности, полученные из продуктов, которые измельчались при режимах с повышением интенсивности разрушения (табл. 4).

Стержневая мельница использовалась для подготовки “питания” дезинтегратора – измельчения руды до крупности менее 2 мм. Согласно данным химического анализа, максимальным содержанием меди и никеля характеризуются фракции, измельченные при 2400 и 3600 об/мин, поскольку именно в них концентрируются халькопирит и частично пирротин. Повышенным содержанием металлов отличаются наиболее тонкие фракции (крупностью –0.02 мм), а также фракция, полученная разрушением при 7200 об/мин из уже обедненной части руды.

Железо, входящее в состав большинства минералов данной руды, при измельчении ведет себя в определенной мере симбатно цветным металлам, преимущественно концентрируясь в классе –0.071+0.02 мм. Повышенное его содержание во фракции –0.02 мм от-

мечается только вследствие разрушающих воздействий при скорости 7200 об/мин. В продуктах, полученных при меньшей интенсивности дезинтеграции, подобной картины не наблюдается. Во фракциях +0.071 мм фиксируется минимальное содержание Fe, что характерно и для цветных металлов. На основании этого можно предположить, что выявленное железо в основном принадлежит сульфидным минералам, и лишь небольшая часть относится к магнетиту.

При наибольшей скорости воздействий обнажаются порообразующие минералы, и на рентгенограмме возрастают пики их рефлексов. В первую очередь, это относится к хризотилу, лизардиту и магнетиту, пики которого ранее фиксировались (рис. 2). Но главное достоинство высокоскоростного разрушения состоит в раскрытии остаточных сростков халькопирита и пирротина с минералами породы, благодаря чему становится возможным флотационное доизвлечение отмеченных сульфидов.

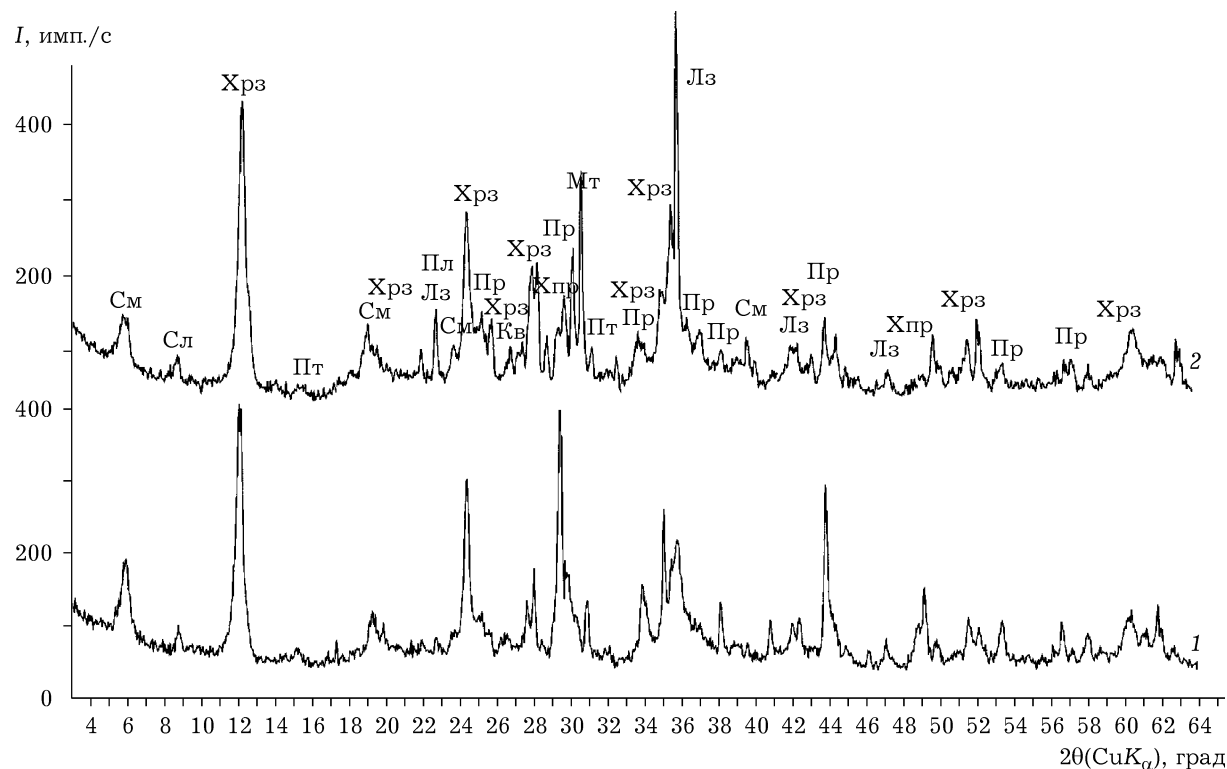


Рис. 2. Рентгенограммы проб, измельченных в дезинтеграторе при 3600 (а) и 7200 об/мин (б). Обозначения: Хрз – Хризотил, Лз – Лизардит, См – Сметтит, Хпр – Халькопирит, Пр – Пирротин, Сл – Слюда, Пл – плагио-лаз, Кв – кварц, Пт – пентландит, Мт – магнетит.

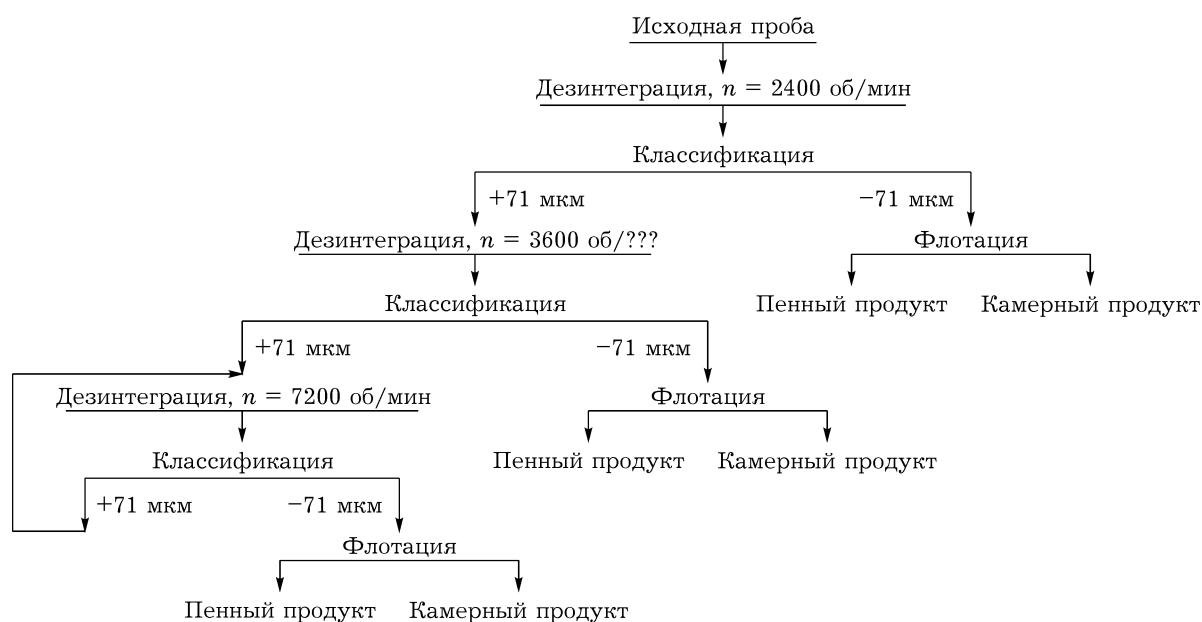


Рис. 3. Схема стадийной дезинтеграции и флотации пробы.

При флотационном разделении сульфидов наиболее эффективным классом считается фракция  $-0.071+0.02$  мм, поэтому желательно, чтобы максимальное содержание цветных металлов приходилось именно на этот интервал крупности. Вместе с тем для тонко вкрапленных руд подобное соотношение не всегда достижимо.

Учитывая изложенное, в дальнейших экспериментах по флотации применялась стадийная дезинтеграция и последовательное доизмельчение продуктов класса  $+0.071$  мм в режимах более высоких разрушающих воздействий.

Схема пробоподготовки и обогащения приведена на рис. 3. Флотации подвергались три продукта крупностью  $-0.071+0$  мм, выделенные при скоростях 2400, 3600 и 7200 об/мин.

Реагентный режим не изменялся по сравнению с выбранными в предыдущих опытах (см. табл. 3). Наиболее высокие показатели получены в результате обогащения фракций, выделенных при втором скоростном режиме (табл. 5).

Содержание меди в флотоконцентрате составляет 14.1 % при степени извлечения почти 30 %. В исходной руде оно равно 1.93 %, следовательно, при технологической целесообразности реально выделять отдельный концентрат с повышенным содержанием меди.

Содержание никеля в данном концентрате также максимальное из достигнутых в приведенных опытах и составляет 3.26 %, но степень извлечения не превысила 12.0 %. Из данных анализа рентгенограмм следует, что наибольшее

ТАБЛИЦА 5

Флотация сульфидов фракции  $-0.071+0.0$  мм, полученных последовательным измельчением пробы в дезинтеграторе

Частота вращения, об/мин	Характеристика продукта	Выход, %	Химический состав, %			Извлечение, %		
			Медь	Никель	Железо	Медь	Никель	Железо
2400	Концентрат, пенный	6.1	8.08	2.60	23.10	25.4	12.7	7.3
	Хвосты, камерный	13.9	0.54	1.38	18.09	3.8	15.5	13.7
3600	Концентрат, пенный	4.6	14.1	3.26	30.11	29.9	12.0	7.2
	Хвосты, камерный	13.4	0.36	1.39	20.28	2.4	14.1	14.1
7200	Концентрат, пенный	10.9	6.10	2.43	25.50	34.6	21.4	14.4
	Хвосты, камерный	51.1	0.15	0.58	16.23	3.9	23.8	43.2
	Исходный	100.0	1.93	1.24	19.22	100.0	100.0	100.0

ТАБЛИЦА 6

Суммарные результаты флотационного обогащения медно-никелевой руды, измельченной при различных режимах

Продукты обогащения	Выход, %	Химический состав, %		Извлечение, %	
		Медь	Никель	Медь	Никель
Концентрат	21.6	8.03	2.65	90.36	45.76
Отходы (хвосты)	78.4	0.25	0.84	9.64	54.24
Исходная проба	100.0	1.93	1.24	100.0	100.0

раскрытие сульфидов имеет место при втором режиме ударных воздействий (см. рис. 1, 2).

Особо эффективен режим разрушения сростков при скорости механических воздействий 7200 об/мин: в этом случае раскрываются оставшиеся самые бедные сростки всех имеющихся в пробе сульфидных минералов и достигается наиболее высокий выход флотоконцентрата – 10.9 %. По качеству концентрат уступает вышеупомянутым продуктам, однако степень извлечения Cu и Ni в этом случае максимальная (34.6 и 21.4 % соответственно), что свидетельствует о широких возможностях дезинтеграторного измельчения при раскрытии сростков.

Анализируя результаты флотационного разделения руды в зависимости от скоростных режимов дезинтеграции, следует выделить наиболее важный из них: разрушение при наиболее высокоэнергетическом режиме позволяет отделять хвосты обогащения с содержанием меди всего 0.15 % и выходом 51.1 % от всей рудной массы.

Содержание никеля в отходах флотации не удалось снизить до <0.58 %, поскольку он находится в упорных, механически не раскрываемых силикатных образованиях. Для извлечения цветных металлов из подобных геоматериалов эффективно применять механохимическую активацию и последующее автоклавное выщелачивание [11].

В табл. 6 приведены качественно-количественные расчетные показатели суммарного концентрата, полученные при использовании последовательного энергонарастающего механического нагружения перед флотационным разделением руды.

Сравнительный анализ результатов флотационного обогащения руды, полностью измельченной при режиме высокоскоростной дезинтеграции (7200 об/мин) и последователь-

ным доизмельчением продукта до крупности +0.071 мм при режимах повышенных механических воздействий, показал, что качество и количество концентратов сопоставимы, но в случае последовательного измельчения продукта часть флотоконцентрата отличается повышенным содержанием меди. Кроме того, при втором варианте удается выделить почти половину рудной массы с отвальным содержанием меди и никеля.

## ВЫВОДЫ

1. Показана высокая эффективность высокоэнергонапряженного измельчения в дезинтеграторе со свободным ударом при раскрытии тонко вкрапленных минералов ценных металлов.

2. Применительно к медно-никелевым рудам Норильского месторождения изучена возможность селективного освобождения халькопирита, пирротина и пентландита из рудных сростков за счет изменения интенсивности механических воздействий регулированием скорости вращения роторов дезинтегратора. Экспериментально установлена возможность получения флотоконцентратов с повышенным содержанием меди и никеля при оптимальной скорости ударного воздействия.

3. Повышение механических нагрузок до определенной величины (7200 об/мин) позволяет раскрывать сростки сульфидных минералов из наиболее сложных и прочных тонко вкрапленных ассоциаций, благодаря чему можно повысить извлечение металлов и перевести в отходы более половины рудной массы в качестве отвальных хвостов с минимальным содержанием Cu (0.15 %) и небольшим количеством Ni (0.58 %). Эти показатели можно считать основным достоинством дезинтеграции руды в режиме свободного удара.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований РАН № 32 “Поисковые фундаментальные научные исследования в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации” (проект “Разработка теоретических и экспериментальных основ механохимических технологий обогащения и химической переработки тонко вкрапленных, трудно вскрываемых руд цветных, редких и редкоземельных металлов АЗРФ”).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Чантурия В. А. // Горный журн. 2007. № 2. С. 2–9.
- 2 Вайсберг Л. А., Круппа П. Т., Баранов В. Ф. // Обогащение руд. 2002. № 3. С. 3–10.
- 3 Общие основы получения цветных металлов: учебник / рук. авт. коллектива А. Н. Бурухин. М.: Норильский никель, 2005. 170 с.
- 4 Бочаров В. А., Игнаткина В. А. Технология обогащения полезных ископаемых. М.: Изд. дом “Руда и металлы”, 2007. Т. 1. 471 с.
- 5 Шадрюнова И. В., Ожогина Е. Т., Колодежная Е. В., Горлова О. Е. // ФТПРПИ. 2013. № 5. С. 180–190.
- 6 Golic V. I., Komachshemko V. I., Drebenstedt K. Mechanochemical Activation of the Ore and Coal Tailing in the Dezintegrator. Switzerland, Bergban: Springer Int. Publ., 2013. 1047. DOI 10. 1007 1978-3-319-02-678-7\_107.
- 7 Юсупов Т. С., Уракаев Ф. Х., Исупов В. П. // ФТПРПИ. 2015. № 3. С. 161–168.
- 8 Ларионов А. Н., Терентьева Е. А., Канарская А. В., Воробьев В. В. // Материалы X Конгресса обогатителей стран СНГ. Москва, 2015. Т. II. С. 497–500.
- 9 Митенков Г. А., Симонова В. Ф., Кунилов В. Е., Стехин А. И. // Основные направления совершенствования техники и технологий обогащения руд цветных металлов. Л.: Механобр, 1990. С. 4–12.
- 10 Арсентьев В. А., Вайсберг Л. А., Устинов И. Д. // Обогащение руд. 2014. № 5. С. 3–9.