

УДК 622.7

**ВЛИЯНИЕ ТОНКИХ ШЛАМОВ НА ВЫБОР
СХЕМ РУДОПОДГОТОВКИ НИОБИЕВЫХ РУД**

**Г. И. Газалеева¹, Е. В. Братыгин¹, И. А. Власов¹,
С. В. Мамонов¹, А. А. Рогожин², А. В. Курков²**

¹Научно-исследовательский и проектный институт обогащения и механической обработки
полезных ископаемых “Уралмеханобр”, E-mail :umbr@umbr.ru,
ул. Хохрякова, 87, 620144, г. Екатеринбург, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт
минерального сырья им. Н. М. Федоровского,

E-mail :kurkov@vims-geo.ru, Старомонетный пер. 31, 119017, г. Москва, Россия

Приведены результаты изучения процесса ошламования ниобийсодержащих руд Вишневогорского месторождения. За критерий ошламования принимается содержание классов крупности менее 50 и 5 мкм, определенное на современном лазерном гранулометре. Выбор оптимальных методов и оборудования измельчения проводился по степени ошламования конечных продуктов. При исследовании использованы центробежная и стержневая мельницы. Для измельчения ниобиевых руд наилучшие результаты по степени ошламования показала стержневая мельница. По результатам экспериментов выбрана технологическая схема рудоподготовки ниобиевых руд с применением специальных методов дезинтеграции. В схеме использовано дробильное оборудование, обеспечивающее наибольшую степень селективности — конусная инерционная дробилка, и наименьшую степень ошламования при измельчении — стержневая мельница.

Степень ошламования, лазерный гранулометр, рудоподготовка, критерий селективности, ниобиевая руда, измельчение, грохочение, технологическая схема

Образование тонких шламов в процессе рудоподготовки неизбежно [1, 2]. Этот процесс зависит от двух факторов: природной шламуемости руды и применяемого оборудования и схем рудоподготовки. На первый фактор повлиять невозможно, поэтому усилия обогатителей направлены на максимальное снижение влияния используемого оборудования и технологий на процесс ошламования руды в технологических переделах.

Традиционно за тонкие шламы принимается класс крупности менее 0.05 мм (50 мкм) [3]. Однако в настоящее время существует современное оборудование, которое имеет возможность определять содержание более тонких классов в продуктах дезинтеграции. К такому оборудованию относятся лазерные гранулометры, способные измерять размеры частиц и гранулометрический состав пробы до 1.0 и 0.5 мкм. Предложенная авторами методика основана на сравнении продуктов дробления и измельчения различных аппаратов по содержанию классов менее 50 и 5 мкм, определенному на лазерном гранулометре (рис. 1).



Рис. 1. Дифракционный лазерный анализатор размера частиц Helos-KR с приставками для сухого (Rodos) и мокрого (Quixel) диспергирования материала образцов

Доказано, что наиболее эффективные методы дезинтеграции минерального сырья — методы селективного дробления, позволяющие проводить вскрытие частиц при максимальном использовании разрушения по границам спайности минералов [4]. Такие методы принято называть методами специальными методами дезинтеграции, используются они в 3-й и 4-й стадиях дробления [5].

Выбор оптимальных методов дробления проводится по трем основным параметрам: степени дробления, которая рассчитывается на основе гранулометрических характеристик исходных и дробленых продуктов, критерию селективности, определяемому по степени раскрытия полезного минерала, и степени ошламования.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования выполнены в лабораторных и полупромышленных условиях ОАО «Уралмеханобр» на примере ниобийсодержащей руды Вишневогорского месторождения, расположенного на Южном Урале. Основным полезным минералом данной руды — пироксид.

Первоначально осуществлялось сравнение дробления фракции менее 20 мм в конусной инерционной (КИД-300А) и центробежной ударной (ДЦ-05) дробилках [6]. Конечная оценка селективности процесса дробления (критерий селективности L_o) [7] проводилась расчетом отношения количества свободных зерен полезного минерала в заданном классе крупности дробленого материала к количеству свободных зерен полезного минерала в заданном классе крупности исходного продукта:

$$L_o = Y_i \frac{N_{ik}}{N_{i0}}, \quad (1)$$

где Y_i — выход i -го класса в дробленном (измельченном) продукте, i — заданный класс крупности ($-2+0$ мм); N_{ik} — количество свободных зерен полезного минерала в заданном классе крупности дробленого или измельченного продукта; N_{i0} — количество свободных зерен полезного минерала в заданном классе крупности исходного материала.

Перечисленные показатели определены на оптическом микроскопе Axio Imager (Carl Zeiss, Германия) с использованием отечественного программного обеспечения «Минерал С-7».

Результаты оценки степени раскрытия пироксидов в процессе селективного дробления показали, что в классе менее 0.2 мм с помощью дробилки КИД-300А в оптимальном режиме происходит полное раскрытие данного минерала. Исходя из этого, выбран размер отверстий сита грохота для тонкого грохочения – 0.2 мм [8–10].

Испытания проводились в центробежной мельнице ЦОМ (рис. 2) при двух скоростных режимах работы — окружной скорости ротора 6000 и 10 500 об/мин. В схеме замкнутого цикла мельницы ЦОМ в качестве аппарата для сухой классификации материала применялся грохот Kroosh с ситом размером 0.2 мм (рис. 3).



Рис. 2. Общий вид мельницы ЦОМ



Рис. 3. Грохот ULSTM 1.5×0.6-Е компании “Kroosh Technologies Ltd”

Для сравнения с мельницей ЦОМ использовалась стандартная стержневая мельница (рис. 4). Исследовалась кинетика процесса измельчения [11]. Кроме того, исследовался процесс грохочения на многочастотном мокром грохоте тонкого грохочения DERRICK Stack Sizer также с применением сита размером 0.2 мм (рис. 5). Результаты оценивались по гранулометрическим характеристикам конечных продуктов в сравнении со схемой с применением сухого центробежного измельчения в мельнице ЦОМ. Также сравнивались количество и гранулометрический состав шламов — частиц крупностью менее 50 и 5 мкм.

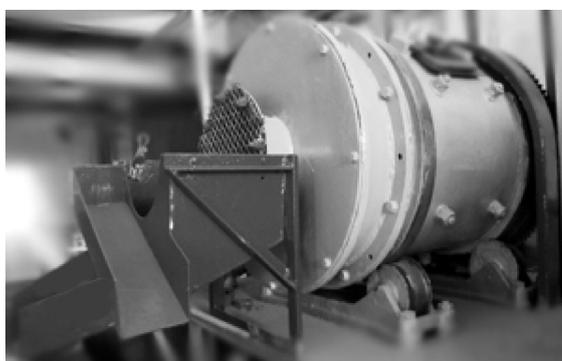


Рис. 4. Лабораторная стержневая мельница



Рис. 5. Грохот DERRICK Stack Sizer

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дробление. Сравнение критерия селективности дробления показало, что дробилка ДЦ имеет уровень значения критерия селективности L_0 при дроблении коренных ниобиевых руд Вишневогорского месторождения значительно ниже, чем дробилка КИД. Для дробилки ДЦ критерий L_0 , определенный по формуле (1), составляет 0.82–0.87 ед., в то время как для дробилки КИД — 1.43–1.755 ед. Степень дробления дробилки КИД [12] также значительно выше, чем у ДЦ — 10 ед. против 2 ед. На рис. 6 представлен пример вида исследуемой фракции при определении критерия селективности.

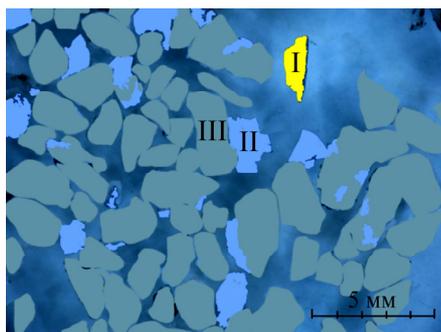


Рис. 6. Проба исходной руды кл. – 2.0 + 0.8 мм. Общий вид зерен пробы с наложенными цветовыми маркерами: пироклор (I), темноцветные (II) и светлоцветные (III) силикаты

С учетом рис. 6, а также подобных фото для исследуемых классов крупности подсчитывалось наличие свободных зерен и сростков в каждом классе крупности, а затем по формуле (1) определялся критерий селективности.

Оценка ошламования продуктов дробления различных дробилок осуществлялась путем анализа содержания в классе менее 2 мм фракций крупности менее 50 и 5 мкм по лазерному гранулометру. Данные анализа приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Содержание фракций менее 50 и 5 мкм в продуктах селективного дробления

Режим	Содержание фракции, %	
	– 50 мкм	– 5 мкм
КИД-3	27.46	7.33
КИД-4	40.07	12.8
КИД-5	30.59	8.22
КИД-6	31.28	9.23
КИД-7	33.86	9.62
КИД-8	27.30	7.22
ДЦ 2	11.22	2.69

Наилучшие показатели с точки зрения низкого ошламования дает дробилка ДЦ, но она не подходит по показателям раскрытия минерала ниобия (пироклора) и критерия селективности. Таким образом, самое низкое ошламование как по содержанию фракции менее 50 мкм (27.3 %), так и менее 5 мкм (7.22 %) дает дробилка КИД при работе в следующем режиме: угол поворота дебаланса 120°, окружная скорость вращения конуса 1420 об/мин, удельный расход электроэнергии 6.99 кВт/т.

Измельчение. Гранулометрические характеристики, полученные при измельчении исходного продукта в мельнице ЦОМ, представлены в табл. 2.

Результаты исследований показали, что наилучшим режимом работы мельницы ЦОМ для раскрытия минералов ниобия в классе крупности менее 0.2 мм является режим с окружной скоростью ротора 10 500 об/мин. При таком режиме содержание готового класса составляет 76.35 % в отличие от режима с окружной скоростью ротора 6 000 об/мин, при котором данный показатель равен 40.82 %.

При использовании грохота Kroosh, работающего в замкнутом цикле с центробежной мельницей, циркуляция составляла 100 %, что гарантирует получение готового продукта крупностью менее 0.2 мм, соответствующего степени полного раскрытия ниобиевых минералов (пироклора) для руд Вишневогорского месторождения.

ТАБЛИЦА 2. Результаты рассева исходного продукта, полученного в мельнице ЦОМ, в установившемся режиме

Класс, мм	Выход, %			
	частный		суммарный	
	6 000 об/мин	10 500 об/мин	6 000 об/мин	10 500 об/мин
+ 2	1.88	—	1.88	—
– 2 + 1.6	1.64	—	3.51	—
– 1. 6 + 1.25	3.41	0.51	6.92	0.51
– 1.25 + 1	2.81	0.75	9.73	1.26
– 1 + 0.8	5.37	1.20	15.10	2.46
– 0.8 + 0.63	4.67	2.20	19.77	4.66
– 0.63 + 0.4	13.02	3.20	32.79	7.86
– 0.64 + 0.315	8.88	4.10	41.68	11.96
– 0.315 + 0.25	10.55	5.44	52.23	17.40
– 0.25 + 0.2	6.95	6.25	59.18	23.65
– 0.2 + 0.16	9.89	12.21	69.07	35.86
– 0.16 + 0.125	4.89	20.55	73.96	56.41
– 0.125 + 0.1	6.38	7.66	80.35	64.07
– 0.1 + 0.071	3.90	15.02	84.25	79.09
– 0.071 + 0.05	6.92	7.20	91.17	86.29
– 0.05 + 0	8.83	13.71	100.00	100.00
	100	100		

Кинетика измельчения ниобиевого продукта Вишневогорского месторождения в стержневой мельнице представлена в табл. 3 и на рис. 7. Рисунок отражает гранулометрические характеристики после измельчения в стержневой мельнице при различном времени помола. Время измельчения составляло 6, 10, 20 и 30 мин.

ТАБЛИЦА 3. Результаты исследования кинетики измельчения в лабораторной стержневой мельнице ниобиевых продуктов Вишневогорского месторождения

Класс крупности, мм	Время измельчения, мин			
	6	10	20	30
+ 2	0.0631	0.0000	0.0000	0.0000
– 2 + 1.6	0.0738	0.0000	0.0000	0.0000
– 1.6 + 1.25	0.1415	0.0091	0.0000	0.0000
– 1.25 + 1	0.3138	0.0106	0.0000	0.0000
– 1 + 0.8	2.0260	0.0454	0.0000	0.0000
– 0.8 + 0.63	4.8226	0.0696	0.0000	0.0000
– 0.63 + 0.4	17.5307	0.3993	0.0530	0.0279
– 0.4 + 0.315	25.7084	3.4846	0.1116	0.0860
– 0.315 + 0.25	39.8086	17.9537	2.6719	0.6493
– 0.2 + 0.16	47.1403	28.0777	6.9239	2.7326
– 0.16 + 0.125	52.6259	36.4534	13.5479	8.9396
– 0.125 + 0.1	62.0020	48.0838	36.0059	31.0866
– 0.1 + 0.071	87.3458	79.7641	84.7056	70.2679
– 0.1 + 0.05	96.8911	95.1603	97.2056	90.7185
0	100	100	100	100

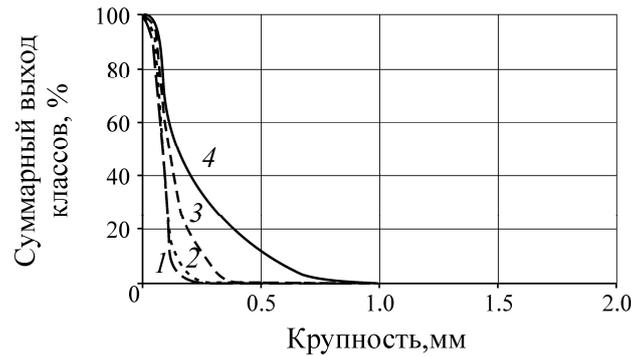


Рис. 7. Кинетика измельчения в стержневой мельнице, мин: 1— 6; 2 — 10; 3 — 20; 4 — 30

Исследование кинетики измельчения в лабораторной стержневой мельнице показало, что после 6 мин степень измельчения низка так же, как и после 10 мин. Степень измельчения является удовлетворительной для 20 и 30 мин измельчения. При этом весь продукт составляет фракцию менее 0.63 мм, а количество шламов ($-50 \mu\text{м}$) больше при 30 мин измельчения и составляет 9.3 % против 3–5 % при остальных режимах. Таким образом, оптимальный кинетический режим измельчения равен 20 мин.

Сравнение исследуемых схем измельчения проводилось по результатам определения гранулометрических характеристик на лазерном гранулометре (рис. 8).

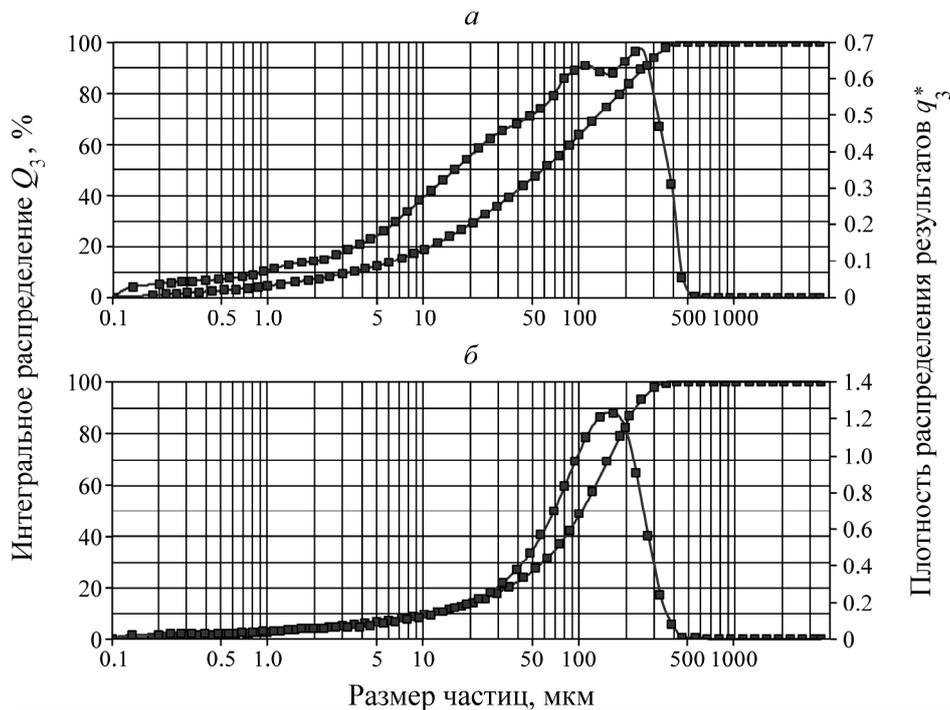


Рис. 8. Гранулометрический анализ продуктов измельчения в мельнице (лазерный анализатор): а — центробежной; б — стержневой

В табл. 4 приведены сравнительные данные по содержанию шламовых фракций менее 50 и 5 мкм в продуктах цикла измельчения с использованием центробежной мельницы ЦОМ и стержневой мельницы.

ТАБЛИЦА 4. Содержание фракций менее 50 и 5 мкм в продуктах циклов измельчения, %

Режим	Содержание фракции	
	– 50 мкм	– 5 мкм
ЦОМ	47.33	12.04
Стержневая мельница	27.15	6.34

Таким образом, для измельчения ниобиевых руд рекомендуется использование стержневой мельницы. Степень ошламования в ней по фракциям менее 50 и 5 мкм составляет соответственно 27.15 и 6.34 %, что в 1.7 и 1.9 раз ниже, чем в центробежной мельнице ЦОМ.

Выбор общей технологической схемы рудоподготовки с применением специальных методов для ниобиевых руд Вишневогорского месторождения основан на использовании оборудования, обеспечивающего наибольшую степень селективности при дроблении (дробилка КИД — 3-я стадия дробления) и наименьшую степень ошламования при измельчении (стержневая мельница). Первую и вторую стадии дробления предлагается осуществлять в традиционных щековых и конусных дробилках, так как в данных стадиях ошламование минимально.

Предлагаемая технологическая схема рудоподготовки приведена на рис. 9.

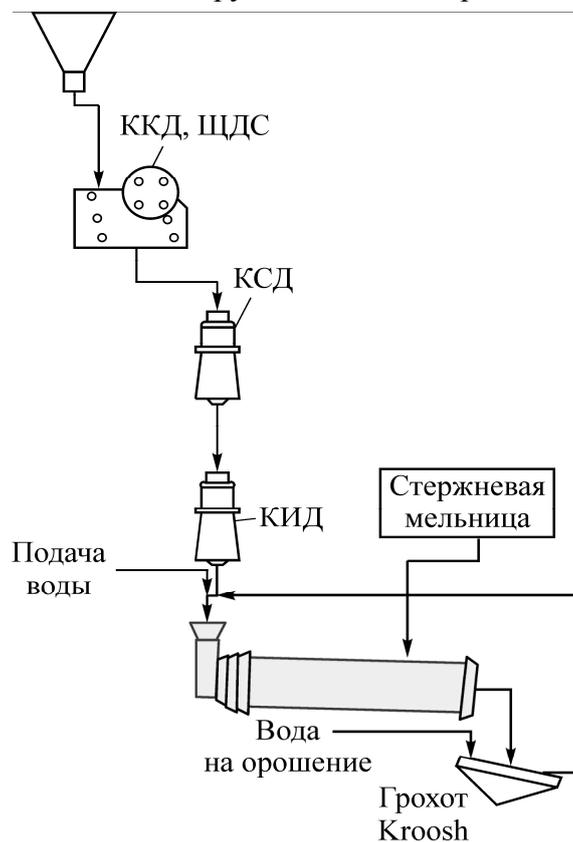


Рис. 9. Предлагаемая оптимальная схема рудоподготовки ниобиевых руд Вишневогорского месторождения: ККД — конусная дробилка крупного дробления, ЩДС — щековая дробилка, КСД — конусная дробилка среднего дробления, КИД — конусная инерционная дробилка

ВЫВОДЫ

Основными критериями оценки степени ошламования руд в процессе рудоподготовки является содержание классов крупности менее 50 и 5 мкм, определенное на лазерном гранулометре.

Для измельчения исследуемых ниобиевых руд Вишневогорского месторождения рекомендуется использование стержневой мельницы. Степень ошламования в ней по фракциям менее 50 и 5 мкм составляет соответственно 27.15 и 6.34%, что в 1.7 и 1.9 раз ниже, чем в центробежной мельнице ЦОМ.

Выбор оптимальной технологической схемы рудоподготовки с применением специальных методов дезинтеграции для ниобиевых руд Вишневогорского месторождения основан на анализе критерия селективности для дробления и степени ошламования для измельчения.

В оптимальной схеме рудоподготовки предлагается использовать оборудование, обеспечивающее наибольший критерий селективности при дроблении (дробилка КИД) и наименьшую степень ошламования при измельчении (стержневая мельница).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревнивцев В. И., Азбель Е. И., Баранов Е. Г. и др. Подготовка минерального сырья к обогащению. — М.: Недра, 1987.
2. Ревнивцев В. И., Гапонов Г. В., Зарогатский Л. П. и др. Селективное разрушение минералов. — М.: Недра, 1988.
3. Определение рационального способа измельчения: метод. указание / Всесоюз. науч.-исслед. ин-т минерального сырья им. Н. М. Федоровского (ВИМС). — М., 1991.
4. Ройтер М., Крах М., Кислинг У., Векслер Ю. Зональная дезинтеграция горных пород вокруг очистных выработок // ФТПРПИ. — 2015. — № 2.
5. Газалеева Г. И., Цыпин Е. Ф., Червяков С. А. Рудоподготовка. Дробление, грохочение, обогащение. — Екатеринбург: Уральский центр академического обслуживания, 2014.
6. Шадрунова И. В., Горлова О. Е., Колодежная Е. В., Кутлубаев И. М. Механизм дезинтеграции металлургических шлаков в аппаратах центробежно-ударного дробления // ФТПРПИ. — 2015. — № 2.
7. Хопунов Э. А. Роль структуры и прочностных характеристик минералов в разрушении и раскрытии руд // Обогащение руд. — 2011. — № 1.
8. Олевский В. А. Кинематика грохотов. — Л.; М.: Metallurgizdat, 1941.
9. Газалеева Г. И., Мамонов С. В. Современное техническое состояние и технологические возможности тонкого грохочения в обогащении руд цветных металлов // Изв. вузов. Горн. журн. — 2013. — № 1.
10. Миренков В. Е. Контактные задачи в механике горных пород // ФТПРПИ. — 2007. — № 4.
11. Чантурия В. А., Вайсберг Л. А., Козлов А. П. Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. — 2014. — № 2.
12. Hukki R. T. The principles of comminution: An analytical summary, Engng. Min. J., 1975, Vol. 176.

Поступила в редакцию 24/XI 2015