

УДК 622.73

**ВЫБОР РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО
СЕЛЕКТИВНОГО ДРОБЛЕНИЯ КВАРЦЕВОЙ РУДЫ**

**С. Р. Корженевский, В. А. Бессонова,
А. А. Комарский, В. А. Мотовилов, А. С. Чепусов**

*Институт электрофизики УрО РАН, E-mail: sk@ier.uran.ru,
ул. Амундсена, 106, 620016, г. Екатеринбург, Россия*

Исследован процесс измельчения горных пород под действием электрогидравлического удара, возбуждаемого электрическим разрядом в пульпе с помощью импульсов высокого напряжения наносекундной длительности и оптимизирующего проведение рудоподготовительных работ. Разработан и испытан импульсный частотный наносекундный высоковольтный генератор импульсной мощностью до 500 МВт. Создана разрядная ячейка проточного типа, работающая при напряжении до 550 кВ. Показана высокая эффективность предложенного метода измельчения минеральных материалов, позволяющая разработать промышленные установки для электрогидравлической обработки горных пород.

Электрический пробой жидкости, импульсный пробой твердого диэлектрика, ударная волна, генератор высоковольтных импульсов, измельчение минеральных материалов, рудоподготовка

В настоящее время основной метод рудоподготовки — механическое дробление, заключающееся в приложении механической нагрузки к материалу, создании в нем напряжений, превышающих пределы прочности на сжатие, растяжение и сдвиг [1]. Вдоль направлений с такими напряжениями происходит разрушение твердого тела на мелкие частицы. При этом при получении частиц размером 20–60 мкм, оптимальных для флотации, лишь около 1 % расходуемой энергии идет на образование новой поверхности, а остальная часть переходит в тепло [2, 3]. Столь низкая эффективность объясняется тем, что измельчение в основном проводится истиранием, при котором подавляющая часть энергии расходуется на упругие и пластические деформации, не завершающиеся образованием новых поверхностей разрушения. Кроме того, при механическом дроблении неизбежно происходит переизмельчение минералов, приводящее к уменьшению полезного выхода. Например, при производстве кварцевого концентрата переизмельчение, истирание руды до размеров частиц менее 0.1 мм ведет к заметным потерям сырья.

Таким образом, дробление крупных кусков рудных пород до частиц определенных размеров, не допускающих переизмельчения, является актуальной задачей.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-08-96021).

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ИМПУЛЬСА НАПРЯЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДРОБЛЕНИЯ ЧАСТИЦ

Известно, что электрический пробой жидкости создает ударные волны, способные разделять рудные конгломераты [4, 5]. Также известно, что минимальный размер тела, которое возможно разрушить ударной волной, создающей усилия сжатия, растяжения и сдвига, определяется произведением времени нарастания давления и скорости звука в твердом теле:

$$d \approx 2Vt,$$

где d — размер объекта; V — скорость ударной волны; t — время нарастания импульса давления.

Применяемые электрогидравлический [4] и электроимпульсный [5] способы измельчения, состоящие в обработке измельчаемого материала электрическими разрядами микросекундной длительности, не позволяют эффективно воздействовать на частицы размером менее 1 мм из-за большой длительности импульсов [6]. Следовательно, если принять скорость ударной волны V равной скорости звука V_s (для горных пород скорость звука составляет тысячи метров в секунду), то для разрушения твердых частиц микронных размеров необходимо создать ударные волны, возбуждаемые при электрическом разряде в жидкости с помощью импульсов высокого напряжения наносекундной длительности.

Работы, проведенные ранее [7, 8], показали эффективность обработки потока пульпы, состоящей из материала, находящегося в жидкости, высоковольтными электрическими импульсами наносекундной длительности в режиме пробоя. Создана опытная установка для селективного раскрытия тонких включений и измельчения твердых материалов высоковольтными электрическими импульсами наносекундной длительности в режиме пробоя, с частотой следования импульсов до 1000 Гц, амплитудой напряжения до 250 кВ, при энергии в импульсе до 1 Дж и длительностью импульса менее 10 нс. При обработке хвостов обогащения сульфидных руд с размерами частиц менее 100 мкм и исходным содержанием упорного золота до 2.2 г/т происходит селективное раскрытие тонких включений с повышением извлекаемости золота на 70%. При этом за счет увеличения активности растворения сульфидов в воде, вызванного образованием новых поверхностей и озонированием воды электрическими разрядами, вода пульпы содержит до 0.8 г/л цинка и до 2 г/л железа. По меди полученный раствор в 16 раз превышает минимальное содержание, пригодное для промышленной добычи (0.05 г/л). Таким образом, раствор является обогащенной жидкой рудой. Во всех испытаниях наблюдалось увеличение удельной поверхности материалов на 15–60%, т. е. их разрушение действительно происходит. Выполненные работы подтвердили, что для разрушения частиц пирита (скорость звука $V_s \approx 8000$ м/с) с размером менее 100 мкм (диапазон, характерный для рудных хвостов) требуются импульсы длительностью

$$t_u \leq \frac{d}{v_u} = \frac{10^{-4}}{8 \cdot 10^3} = 1.25 \cdot 10^{-8} \text{ с.}$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Дальнейшие исследования влияния длительности электрического импульса на эффективность дробления минералов электрогидравлическим ударом, возбуждаемым при электрическом разряде в пульпе, осуществлялись на частицах кварца. Для проведения работы собрана экспериментальная установка на базе импульсного частотного наносекундного генератора “Пирит-3” импульсной мощностью до 500 МВт, напряжением до 520 кВ (рис. 1). Особенностью данного генератора высоковольтных импульсов (ГВИ) является полностью твердотельная коммутация и возможность регулировки временных параметров выходного импульса (рис. 2). Длительность импульса на полувысоте регулируется от 15 до 60 нс.

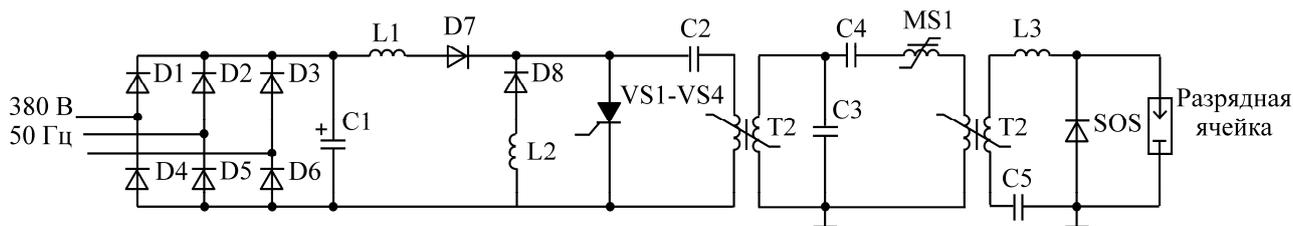


Рис. 1. Электрическая схема генератора “Пирит-3”

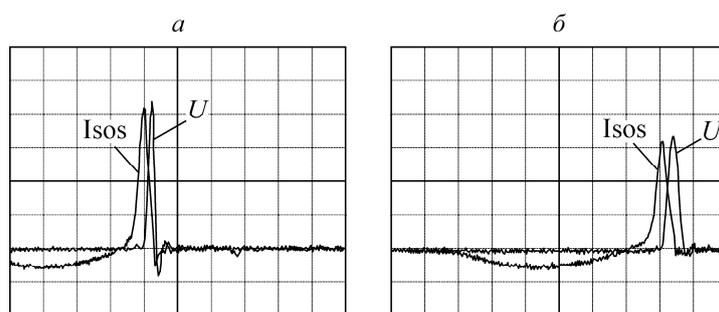


Рис. 2. Осциллограмма выходного напряжения U на нагрузке 1 кОм и тока полупроводникового прерывателя Isos генератора “Пирит-3”: *a* — индуктивность L3 0.2 мкГн, амплитуда напряжения на нагрузке 520 кВ, длительность импульса на полувысоте 19 нс, время нарастания импульса напряжения 17 нс, амплитуда тока обратной накачки прерывателя 2050 А, развертка — 100 нс/дел; *б* — индуктивность L3 2.0 мкГн; амплитуда напряжения на нагрузке 410 кВ; длительность импульса на полувысоте 36 нс; время нарастания импульса напряжения 34 нс; амплитуда тока обратной накачки прерывателя 1610 А, развертка 100 нс/дел

Разрядная ячейка 1 с цилиндрическим отверстием D диаметром 40 мм для прохождения пульпы выполнена из электроизоляционного материала (рис. 3). Заземленный электрод 2 представляет собой острие и расположен так, что кончик острия находится на оси цилиндра. Второй электрод 3 высоковольтный, изготовлен из сетки с размером ячейки 1.0 мм в виде диска с диаметром, равным диаметру цилиндрического отверстия ячейки. Расстояние между электродами h выбирают из условия стабильного пробоя пульпы.

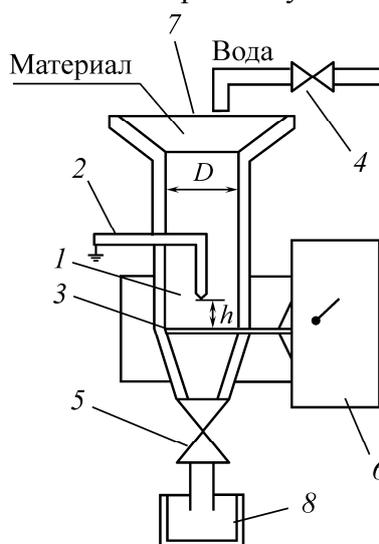


Рис. 3. Экспериментальная установка: 1 — разрядная ячейка; 2 — заземленный электрод; 3 — высоковольтный электрод; 4, 5 — вентили; 6 — ГВИ “Пирит-3”; 7 — загрузочная горловина; 8 — приемный бак

Установка работает следующим образом. Разрядная ячейка 1 заполняется водой. Далее с помощью вентиляей 4 и 5, расположенных на трубопроводе с водой и на выходе разрядной ячейки, организуется поток воды через ячейку со скоростью 4 л/мин. Затем включается ГВИ 6 и в загрузочную горловину 7 подается материал со скоростью 2 кг/мин. Образовавшаяся таким образом пульпа обрабатывается в разрядной ячейке 1 и собирается в приемном баке 8.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования проводились на частицах кварца, предоставленных ОАО “Кыштымский ГОК”. На начало работ было известно о результатах измельчения кварцевой породы электроимпульсным методом [9]. С помощью импульсов высокого напряжения микросекундной длительности удалось измельчить материал до частиц размером 2–3 мм, тогда как выходным продуктом при производстве кварцевого концентрата является товарная фракция крупности $-0.3+0.1$ мм. Скорость звука в кварце $V_s \approx 5670$ м/с. Следовательно, при времени нарастания импульса давления $t \approx 15$ нс разрушение ударными волнами от электрического пробоя жидкости возможно для частиц с размерами не менее $d \approx 2V_s t = 2 \cdot 5670 \cdot 15 \cdot 10^{-9} \leq 173$ мкм, при времени нарастания импульса давления $t \approx 30$ нс минимальный размер частиц равен 345 мкм.

Учитывая изложенное, эксперименты проводились при временах нарастания импульса напряжения, прикладываемого к разрядному промежутку, 17 либо 34 нс. Частота следования импульсов выбрана 250 Гц.

Исходный размер частиц, представляющих собой сростки кварца, отобранных с одного из этапов дробления исходной породы, соответствовал классу крупности $-30+10$ мм (рис. 4а). Пробы кварца предварительно отмывались от частиц размером менее 1 мм.

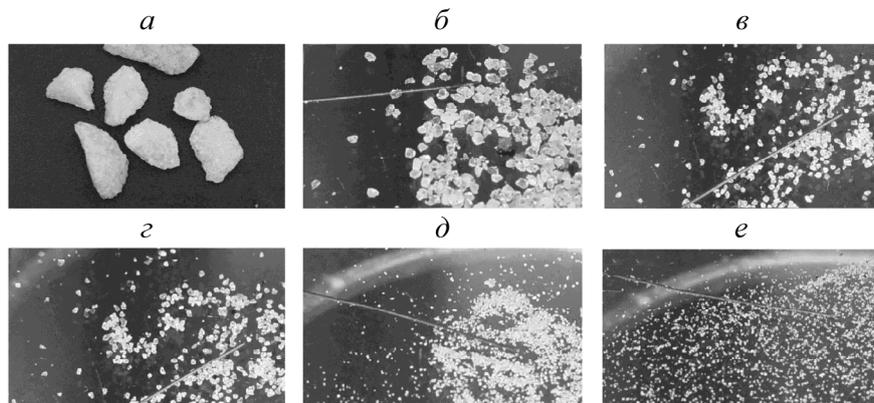


Рис. 4. а — сростки кварца, класс крупности $-30+10$ мм; б–е — кварц после обработки: б — фракция более 0.5 мм; в — фракция 0.315–0.5 мм; г — фракция 0.25–0.315 мм; д — фракция 0.16–0.25 мм; е — фракция менее 0.16 мм. Диаметр проволоки 200 мкм

После обработки в экспериментальной установке пробы высушивались. Далее проводился анализ: материал разделялся на фракции с помощью лабораторных сит У1-ЕСЛ с размером ячеек 0.1, 0.16, 0.25, 0.315 и 0.5 мм.

Результаты по определению массовой доли фракций, усредненные по 10 экспериментам, приведены в таблице.

Распределение частиц кварца по размерам после обработки, %

Время нарастания импульса, нс	Массовая доля фракции при размере частиц, мм					
	-0.1	-0.16+0.1	-0.25+0.16	-0.315+0.25	-0.5+0.315	-1.0+0.5
17	3	12	49	28	7	1
34	1	5	11	21	55	7

ВЫВОДЫ

Предложен способ измельчения материала путем обработки потока пульпы высоковольтными электрическими импульсами наносекундной длительности в режиме пробоя.

Создана опытная установка для измельчения твердых материалов высоковольтными электрическими импульсами наносекундной длительности в режиме пробоя с частотой следования импульсов в сотни герц и амплитудой импульсов напряжения более 500 кВ. Опытная установка, использующая аксиально симметричную двухэлектродную разрядную ячейку проточного типа, работает при частоте следования импульсов до 300 Гц.

Показано существенное влияние временных характеристик импульса напряжения на эффективность дробления частиц твердых материалов. Данный метод измельчения твердых частиц позволяет получать фракции необходимого размера, не допуская переизмельчения исходного материала. Применение при производстве кварцевого концентрата наносекундных ГВИ, формирующих импульсы напряжения со временем нарастания 15–20 нс и длительностью на полувысоте 20–25 нс, обеспечивает более эффективное использование исходного сырья, уменьшая потери из-за переизмельчения при механическом дроблении в несколько раз. Выход товарной фракции с размерами частиц от 0.1 до 0.3 мм достигает 89 %. Кроме того, исключается попадание в материал инородных примесей от рабочих тел механических измельчителей, что в дальнейшем облегчает очистку готового продукта.

Авторы выражают благодарность генеральному директору ОАО «Кыштымский ГОК» В. Г. Кузьмину за помощь в проведении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревнивцев В. И., Гапонов Г. В., Зарогатский Л. П. и др. Селективное разрушение минералов / под ред. В. И. Ревнивцева. — М.: Недра, 1988. — 286 с.
2. Блехман И. И., Финкельштейн Г. А. К вопросу об избирательном раскрытии полезных минералов при минимальном переизмельчении их // Совершенствование и развитие процесса подготовки руд к обогащению. Вып. 140. — Л.: Механобр, 1975. — С. 149–153.
3. Гийо Р. Проблема измельчения материалов и ее развитие / пер. с франц. под ред. Г. С. Ходакова. — М.: Лит. по стр-ву, 1964. — 112 с.
4. Юткин Л. А. Электрогидравлический эффект. — М.; Л.: Машгиз, 1955. — 56 с.
5. Гулый Г. А., Малюшевский П. П. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах. — Киев: Наук. думка, 1977. — 174 с.
6. Усов А. Ф., Семкин Б. В., Зиновьев Н. Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. — Л.: Наука, 1987. — 179 с.
7. Пат. № 2150326 РФ, МПК В02С19/18. Способ и установка для селективного раскрытия тонких включений из твердого материала / Ю. А. Котов, С. Р. Корженевский, В. А. Мотовилов и др. // Оpubл. в БИ. — 2000. — № 16.
8. Котов Ю. А., Месяц Г. А., Филатов А. Л., Корюкин Б. М., Борисков Ф. Ф., Корженевский С. Р., Мотовилов В. А., Щербинин С. В. Комплексная переработка пиритовых отходов ГОКов наносекундными импульсными воздействиями // ДАН. — 2000. — Т. 372. — № 5. — 654–656.
9. Зиновьев Н. Т., Курец В. И., Филатов Г. П., Юшков А. Ю. Энергетические и размерные характеристики электроимпульсного разрушения кварцитов // Изв. вузов. Физика. — 2011. — № 1/2.

Поступила в редакцию 11/III 2015