

Оптимизация режимов электроразрядного дробления кварцевого сырья

С.С. Кондратьев^{1,}, А.А. Жерлицын¹, В.М. Алексеенко¹, А.И. Непомнящих²,
А.П. Жабоедов², В.С. Романов³*

¹*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

²*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия*

³*ЗАО «Кварцевые материалы», Иркутск, Россия*

**parazit@sibmail.com*

Аннотация. Одной из задач технологии получения кварцевых концентратов является дезинтеграция кварцевой породы до фракции размером от 100 до 300 мкм. Традиционно для этих целей используют механическое дробление, термодробление (терморазупрочнение) и истирание. В качестве альтернативы рассматривается электроразрядный способ измельчения, в котором рабочим инструментом является канал сильноточного разряда в воде, инициируемый высоковольтным импульсом напряжения. В данной работе исследованы различные режимы электроразрядного измельчения кварцевого сырья с целью повышения выхода фракции 100–300 мкм. В качестве сырья использовались сливные кварциты Восточного Саяна с исходным размером кусков ~25 мм. В результате оптимизации параметров разряда достигнут выход необходимой фракции не менее 50% при переизмельчении не более 21% от массы кварцевого сырья. Показано, что для эффективной электроразрядной дезинтеграции не требуется предварительного терморазупрочнения. Микроскопические исследования на оптическом микроскопе в проходящем свете показали, что кварцевые агрегаты, полученные при механическом дроблении, содержат большое количество флюидных включений, тогда как после электроразрядного дробления флюидные включения не обнаружены.

Ключевые слова: электроразрядное дробление, измельчение кварца, сверхчистый кварцевый концентрат.

1. Введение

Технология получения кварцевых концентратов зависит от свойств породообразующих минералов и уровня развития техники. На сегодняшний день технологические схемы получения кварцевого концентрата для различных типов сырья включают в себя следующие этапы подготовки: дробление, грохочение, терморазупрочнение (термодробление), измельчение, магнитная и электростатическая сепарация, различные методы флотации, высокотемпературное хлорирование и другие [1]. Одним из основных подготовительных этапов является дезинтеграция кварцевого сырья до фракции 100–300 мкм. Традиционно для этих целей используют механическое дробление, терморазупрочнение и истирание. Данные операции не обеспечивают высокую селективность и приводят к переизмельчению ценного продукта, а при дроблении и измельчении химически чистого сырья могут приводить к его загрязнению. На сегодняшний день альтернативой является электроразрядный способ измельчения материалов [2], в котором движущиеся рабочие узлы отсутствуют и рабочим инструментом является канал сильноточного разряда в воде, инициируемый высоковольтным субмикросекундным импульсом напряжения. При таком способе имеются обоснованные предпосылки к минимизации загрязнения и получению относительно узкого фракционного распределения кварцевого концентрата.

В данной работе исследовано измельчение кварцевого сырья методом электроразрядного дробления и оценено его влияние на эффективность химического обогащения кварцитов Восточного Саяна. Определены и отработаны оптимальные режимы, позволяющие получить наибольший выход полезной фракции.

2. Схема экспериментов

Эксперименты выполнены на трех субмикросекундных импульсно-периодических генераторах при частоте следования импульсов до 7 Гц. Обобщенная принципиальная схема

экспериментов приведена на Рис.1. Параметры генераторов обобщены в Таблице 1. Генераторы основаны на схеме импульсной зарядки высоковольтного емкостного накопителя через повышающий трансформатора [3, 4]. Низковольтный емкостной накопитель C_1 заряжается до напряжения $U_0 \leq 2$ кВ источником постоянного тока. По окончании зарядки срабатывает тиристор VS , который подключает низковольтный накопитель C_1 к высоковольтному емкостному накопителю C_2 через повышающий трансформатор T . Осуществляется импульсная зарядка C_2 через защитный резистор R и зарядную индуктивность L . При достижении 90% от максимального зарядного напряжения срабатывает газовый неуправляемый разрядник S , который коммутирует накопитель C_2 на разрядный промежуток камеры дробления. Величина зарядного напряжения высоковольтного накопителя C_2 регулируется величиной зарядного напряжения U_0 низковольтного накопителя и величиной напряжения срабатывания газового разрядника S .

Система регистрации электрофизических параметров включает в себя: емкостной делитель напряжения на высоковольтном накопителе для регистрации зарядного напряжения; емкостной делитель напряжения в камере дробления для регистрации напряжения на разрядном промежутке; пояс Роговского в камере дробления для регистрации тока разряда.

Камера дробления имеет осесимметричную геометрию с расположением высоковольтного электрода по оси камеры. Диаметр камеры 258 мм. Заземленный электрод закреплён сбоку от высоковольтного таким образом, что в горизонтальной плоскости концы электродов расположены примерно на одном уровне. Диаметр обоих электродов 10 мм с закруглением на рабочем торце радиусом 5 мм. Минимальное расстояние между электродами в рабочей зоне регулировалось в диапазоне от 6 мм до 20 мм в зависимости от зарядного напряжения высоковольтного накопителя генератора. Материал электродов – нержавеющая сталь или технически чистое железо. Камера дробления заполнялась дистиллированной водой с проводимостью $2 \cdot 10^{-5}$ См/м. При дроблении для целей химического и оптического анализа, использовались электроды из технического чистого железа и деионизованная вода.

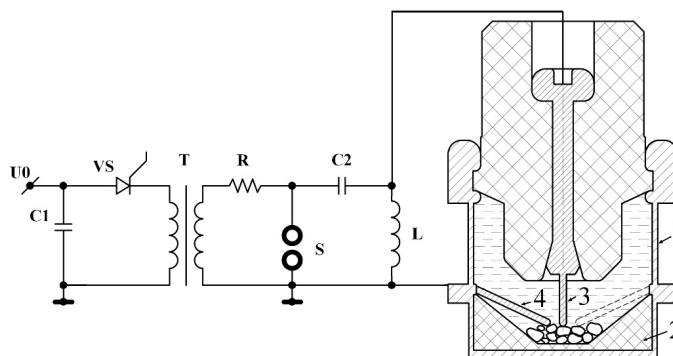


Рис.1. Схема экспериментов: 1 – корпус камеры дробления, 2 – нижний изолятор, 3 – высоковольтный электрод, 4 – земляной электрод.

В качестве сырья использовались сливные кварциты Восточного Саяна с исходным размером кусков ~25 мм. Дроблению подвергался кварц как после терморазупрочнения, так и без него.

Таблица 1. Параметры генераторов для электроразрядного дробления. C – емкость высоковольтного накопителя, U_{max} – максимальное зарядное напряжение, $T_{current}$ – период колебаний разрядного тока

	C , нФ	U_{max} , кВ	$T_{current}$, нс
1	8	300	1040
2	15.4	300	1480
3	49.9	100	1800

Для определения фракционного распределения продуктов дробления полученная пульпа просеивалась через набор сит из нержавеющей стали с ячейками 1, 0.5, 0.25, 0.1 и 0.05 мм. Для химического и оптического анализа пульпа просеивалась через сита с нейлоновой сеткой с ячейками 300 и 106 мкм.

3. Результаты экспериментов

Результаты дробления кварца после терморазупрочнения для четырех режимов приведены в Таблице 2. Результаты дробления кварца без терморазупрочнения в аналогичных режимах даны в Таблице 3.

Данные Таблицы 2 показывают, что выход фракции 0.1–0.25 мм при дроблении кварца после предварительного терморазупрочнения зависит от зарядного напряжения высоковольтного накопителя и достигает 42% при зарядном напряжении 200 кВ (режим № 2). Уменьшение зарядного напряжения до 100 кВ приводит к значительному снижению эффективности дробления. Ёмкость высоковольтного накопителя не влияет на эффективность дробления: увеличение ёмкости накопителя в два раза при сохранении уровня зарядного напряжения и увеличении тока в 2.5 раза не даёт заметного изменения выхода необходимой фракции.

Таблица 2. Фракционное распределение в процентах от начальной массы в различных режимах дробления кварца после предварительного терморазупрочнения: C_2 – ёмкость накопителя, U – выходное напряжение, I – амплитуда тока разряда, t_f – фронт импульса тока, E – суммарные энергозатраты в серии импульсов

№	C_2 , нФ	U , кВ	I , кА	t_f , нс	E , кДж	Массовая доля фракции в %					
						более 1 мм	0.5–1 мм	0.25–0.5 мм	0.1–0.25 мм	0.05–0.1 мм	менее 0.05 мм
1	8	160	3.4	260	133	1.3	4.4	48.7	32.2	5.8	7.6
2	8	200	4.2	260	208	0	0.5	33.4	41.6	9.8	14.7
3	15.4	160	9.6	370	256	0	0.8	43.0	33.1	6.9	16.2
4	49.9	90	26.0	450	263	35.5	9.9	32.8	11.3	1.4	9.1

Таблица 3. Фракционное распределение в процентах от начальной массы в различных режимах дробления кварца без предварительного терморазупрочнения: C_2 – ёмкость накопителя, U – выходное напряжение, I – амплитуда тока разряда, t_f – фронт импульса тока, E – суммарные энергозатраты в серии импульсов

№	C_2 , нФ	U , кВ	I , кА	t_f , нс	E , кДж	Массовая доля фракции в %					
						более 1 мм	0.5–1 мм	0.25–0.5 мм	0.1–0.25 мм	0.05–0.1 мм	менее 0.05 мм
1	8	160	3.4	260	307	0.2	0.8	39.1	38.6	7.2	14.1
2	8	200	4.2	260	208	0	0.7	38.2	40.3	8.9	12.0
3	15.4	160	9.6	370	256	0	2.7	32.6	36.3	10.2	18.2
4	49.9	90	26.0	450	263	70.8	2.5	13.5	7.2	1.2	4.8

Из сравнения данных Таблицы 2 и Таблицы 3 следует, что электроразрядное дробление позволяет производить эффективную обработку кварцевого сырья без предварительного терморазупрочнения. При этом сохраняется зависимость эффективности дробления от зарядного напряжения и независимость от ёмкости высоковольтного накопителя.

Отдельно стоит отметить, что модернизация камеры дробления путем установки трех боковых электродов вместо одного позволила достигнуть выхода фракции 100–300 мкм свыше 50 % в режиме дробления № 2.

Результаты исследования элементного анализа исходной породы и кварцевых концентратов представлены в Таблице 4. Качество используемой при дроблении воды не сказывается на характеристиках кварцевых концентратов. Микроскопические исследования, кварцевой крупки фракцией 100–300 мкм, на оптическом микроскопе OLIMPUS BX-51 в проходящем свете показали, что кварцевые агрегаты, полученные при механическом

истирание, содержат большое количество флюидных включений, тогда как в кварцевых агрегатах, полученных при электроразрядном дроблении флюидные включения не обнаружены.

Таблица 4. Массовые доли примесей в исходном материале и кварцевой крупке 100–300 мкм после механического дробления и электроразрядного, ppm. 1 – кварцит сливной, исходный; 2 – крупка 100–300 мкм из 1 пробы после механического дробления; 3 – проба 2 после химического обогащения; 4 – кварцит сливной, крупка 100–300 мкм после электроразрядного дробления; 5 – проба 4 после химического обогащения

	Fe	Al	Ti	Ca	Mg	Cu	Mn	Na	K	Li	Σ
1	10.2	33.7	1.42	4.9	3.1	0.15	0.096	7.6	15.3	0.47	76.9
2	2.7	18.5	0.8	4	1.8	0.07	0.025	6.4	4.8	0.41	39.73
3	0.41	10.3	0.77	2.5	0.9	0.053	0.05	5.2	1.3	0.42	21.88
4	6.8	17.9	0.94	4.2	1.7	0.23	0.067	5.5	4.2	0.45	41.92
5	0.4	10.6	0.65	2.1	0.7	0.045	0.005	5	1.1	0.44	21.06

4. Выводы

В результате оптимизации режимов электроразрядного дробления достигнут выход фракции 100–300 мкм на уровне 50 % для сливных кварцитов Восточного Саяна. При этом содержание переизмельченной фракции не превысило 21% от общей массы кварцевого сырья. Для эффективной электроразрядной дезинтеграции кварцитов не требуется предварительное терморазупрочнение материала, что значительно упрощает технологическую схему получения кварцевого концентрата.

Основным фактором, влияющим на выход необходимой фракции, является уровень зарядного напряжения высоковольтного накопителя. При этом величина разрядного тока не оказывает заметного влияния на эффективность дробления.

Инструментальный анализ продуктов дробления показал незначительное загрязнение исходного чистого материала. При этом, в отличие от кварцевых агрегатов, полученных при механическом истирании, в кварцевых агрегатах, полученных при электроразрядном дроблении, флюидные включения не обнаружены.

5. Список литературы

- [1] Jung, L., *High purity natural quartz*. (New Jersey: Liberty Corner, 1992).
- [2] Dal Martello E., Bernardis S., Larsen R. B., Tranell G., Di Sabatino M., & Arnberg, L., *Powder Technol.*, **224**, 209, 2012; doi: 10.1016/j.powtec.2012.02.055
- [3] Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Vizir V.A., Kumpyak V.V., Zorin V.B., Kiselev V.N., *Rev Sci Instrum.*, **81**(10), 103506, 2010; doi: 10.1063/1.3497307
- [4] Kovalchuk B.M., Kharlov A.V., Kumpyak E.V., Sinebrykhov V.A., *J. Instrum.*, **8**, 09012, 2013; doi: 10.1088/1748-0221/8/09/P09012