

## Параллельная работа камер для электроимпульсного дробления

*В.М. Алексеенко, А.А. Жерлицын\*, А.В. Козырев, С.С. Кондратьев,  
Н.С. Семенюк, А.Г. Ситников*

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия  
\*andzh@oit.hcei.tsc.ru*

**Аннотация.** Выполнены экспериментальные и численные исследования возможности снижения емкости высоковольтного накопителя и запасаемой энергии без снижения эффективности электроимпульсного дробления. Дроблению подвергались кварциты с исходным размером кусков около 25 мм. Интересуемый (полезный) размер фракции продукта дробления составлял 100–300 мкм. При этом решалась задача повышения производительности электроимпульсного дробления за счет разделения емкостного накопителя на параллельные ветви и реализации параллельной работы искровых каналов. Показано, что деление накопителя на две ветви и использование двух параллельных разрядов в сравнение с использованием всего накопителя с одним каналом разряда позволяет одновременно двукратно снизить удельные энергозатраты на получение нужной фракции и двукратно повысить производительность дробления.

**Ключевые слова:** электроимпульсное дробление, высоковольтный импульсный генератор.

### 1. Введение

Электроимпульсный способ дробления с помощью высоковольтного сильноточного разряда в жидкости рассматривается как альтернатива традиционным механическим методам разрушения [1–3]. Основными параметрами, которые определяют конкурентоспособность способа, являются энергоэффективность и производительности дробления, а также фракционный состав продукта дробления. Производительность процесса дробления растёт с увеличением уровня запасаемой энергии питающего генератора, но при этом происходит увеличение энергетических затрат [4]. Для одновременного обеспечения низкого уровня энергетических затрат и высокой производительности процесса дробления предлагается использовать систему независимых параллельных искровых каналов по аналогии с работой [5].

Работа посвящена проверке предлагаемого подхода. Экспериментально и численно исследована возможность разделения емкостного накопителя энергии на параллельные ветви и реализации параллельной работы двух камер дробления. Дроблению подвергались кварциты с исходным размером кусков около 25 мм. Получены данные по энергоэффективности и производительности процесса дробления, а также данные по фракционному составу продуктов дробления для разных режимов работы.

### 2. Схема эксперимента

Схема эксперимента показана на Рис. 1. В исследованиях использовался высоковольтный импульсный генератор с емкостью накопителя энергии  $C=8$  нФ и зарядным напряжением  $U_0=200$  кВ. Рассмотрено три варианта его включения: 1) для разряда в камере дробления использовался весь накопитель емкостью 8 нФ; 2) накопитель разделен на две параллельные ветви по 4 нФ, для разряда в камере дробления использовалась только одна половина; 3) использовались две идентичные камеры дробления, накопитель разделен на две параллельные ветви по 4 нФ, каждая ветвь разряжалась на свою камеру дробления.

Система регистрации электрофизических параметров включает в себя: емкостной делитель напряжения для регистрации зарядного напряжения высоковольтного емкостного накопителя энергии; емкостной делитель напряжения в камере дробления для регистрации

напряжения на входе камеры; пояс Роговского в камере дробления для регистрации тока разряда.

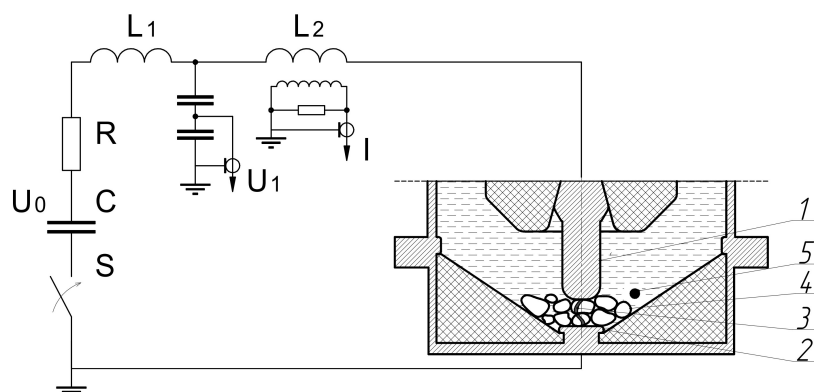


Рис. 1. Схема дробления высоковольтными электрическими импульсами: 1 – высоковольтный электрод; 2 – заземленный электрод; 3 – канал разряда; 4 – объект разрушения; 5 – датчик давления;  $C$ ,  $L=(L_1+L_2)$ ,  $R$  – эквивалентные емкость, индуктивность и сопротивление разрядного контура генератора;  $U_0$  – зарядное напряжение высоковольтного емкостного накопителя.

Фотография высоковольтного емкостного накопителя с двумя камерами дробления приведена на Рис. 2. Камеры дробления имеют осесимметричную геометрию с верхним расположением высоковольтного электрода. Диаметр камер 258 мм. Материал электродов – нержавеющая сталь. Камеры дробления заполнялись дистиллированной водой с проводимостью  $2 \cdot 10^{-5}$  См/м. Межэлектродный зазор в камерах дробления составлял 11 мм. Дроблению подвергались сливные кварциты Восточного Саяна с исходным размером кусков  $\sim 25$  мм. Интересуемый (полезный) размер фракции продукта дробления составлял 100-300 мкм. Для определения фракционного распределения продуктов дробления полученная пульпа просеивалась через набор сит из нержавеющей стали с ячейками 1.0, 0.5, 0.25, 0.1 и 0.05 мм.



Рис. 2. Генератор с двумя камерами для электроимпульсного дробления.

### 3. Экспериментальные результаты

Экспериментальные осциллограммы напряжения и тока разряда генератора с накопителем емкостью 8 и 4 нФ приведены на Рис. 3. Влияние снижения емкости накопителя и, соответственно, запасаемой энергии, на характеристики продукта дробления демонстрирует Таблица 1, где обобщены данные по фракционному составу продукта дробления, удельным энергозатратам и производительности процесса дробления.

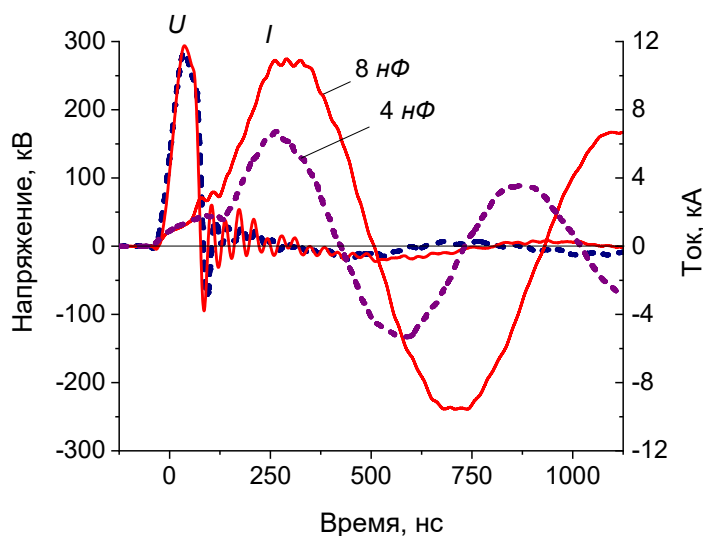


Рис. 3. Осциллограммы тока  $I$  и напряжения  $U$  разряда при использовании накопителя с емкостью 8 нФ (сплошные линии) и 4 нФ (пунктирные линии).

**Таблица 1.** Результаты дробления кварца:  $C$  – емкость высоковольтного накопителя энергии, питающего канал разряда в одной камере дробления,  $N$  – число импульсов в серии,  $w$  – удельные энергозатраты на получение полезной фракции 100–300 мкм,  $m$  – производительность дробления, определяемая как масса полезной фракции 100–300 мкм, пересчитанная на 1 импульс.

№	$C$ , нФ	Число импульсов	Фракция				$w$ , кВт·ч/т	$m$ , мг/импульс	Камера
			+500 мкм, %	+300 мкм, %	+100 мкм, %	-100 мкм, %			
1	8	1000	10.8	24.1	24.3	40.7	230	200	Одна
2	4	1500	12.4	25.2	32.8	29.7	130	175	Одна
3	2×4	1500	8.6	24.5	36.5	30.4	115	390	Две

Напряжение на разрядном промежутке нарастает со средней скоростью около 5 кВ/нс до амплитудного значения свыше 250 кВ. Превышение напряжения на промежутке зарядного напряжения высоковольтного емкостного накопителя обусловлено межэлектродной емкостью камеры дробления. До пробоя разрядного промежутка осциллограммы напряжения и тока слабо различаются для накопителей емкостью 8 и 4 нФ. Различие проявляется после пробоя промежутка и начала протекания тока разряда. Снижению емкости накопителя в 2 раза приводит к уменьшению амплитуды тока разряда с 11 до 7 кА и периода тока разряда с 900 до 600 нс.

Данные Таблицы 1 демонстрируют, что при двукратном снижении емкости накопителя и, соответственно, запасаемой энергии, уменьшилось переизмельчение материала (фракция менее 100 мкм), а выход полезной фракции 100–300 мкм не сократился (варианты № 1 и № 2). При этом значительно снизились удельные энергозатраты на получение нужной фракции с ~230 до ~130 кВт·ч/т. Деление накопителя на две ветви и использование двух параллельных разрядов в сравнение с использованием всего накопителя с одним каналом разряда

позволило одновременно двукратно снизить удельные энергозатраты на получение нужной фракции и двукратно повысить производительность дробления (варианты № 1 и № 3).

#### 4. Результаты теоретического моделирования

Для интерпретации полученных результатов использована гидродинамическая модель расширения проводящего канала в жидкости с учетом процессов в разрядном контуре генератора и кинетики плазмы в разрядном канале [6]. Показано, что при двукратном уменьшении емкости накопителя снижается длительность импульса электрической мощности разряда, но амплитуда импульса выделяемой мощности изменяется не значительно (на  $\sim 10\%$ ) (Рис. 4). Как следствие, практически не изменяется амплитуда импульса давления в генерируемой акустической волне.

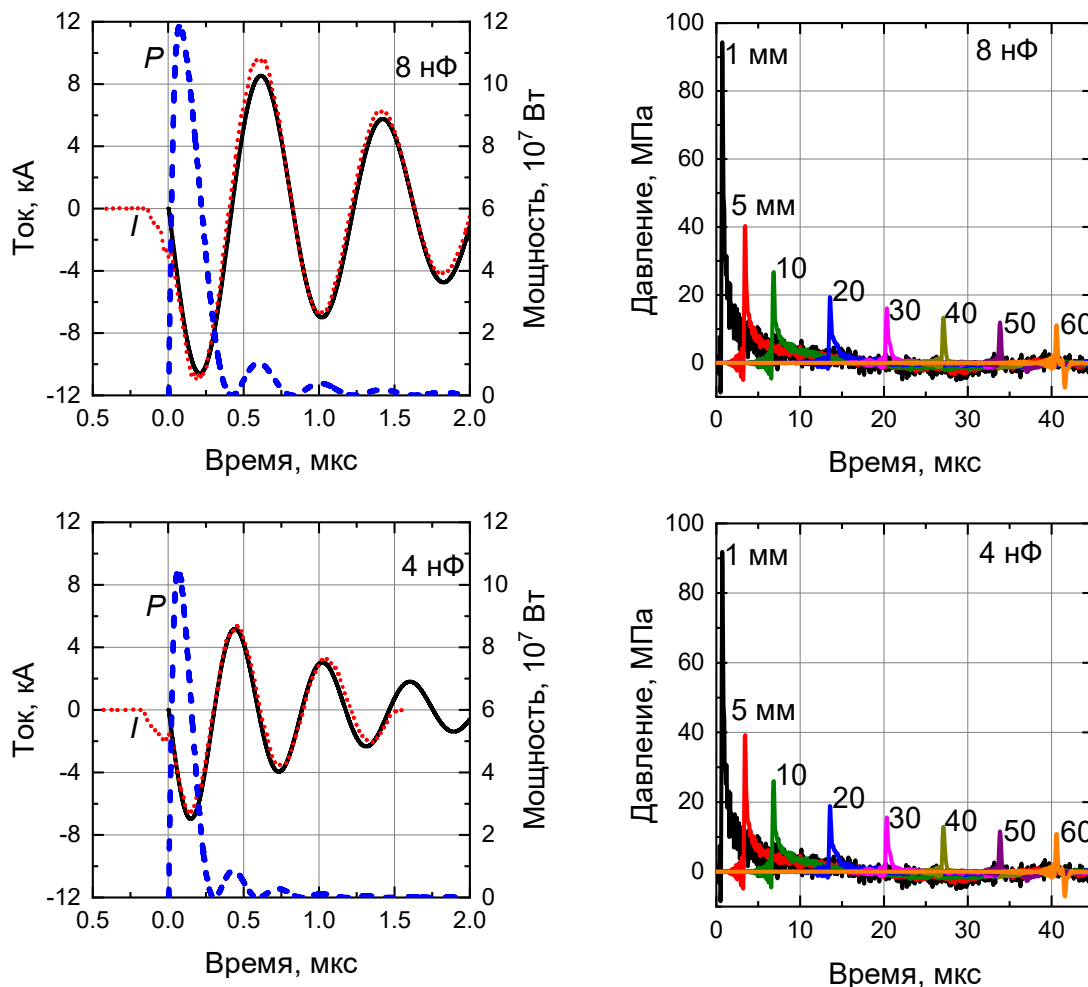


Рис. 4. Слева: Экспериментальная (красные точки) и расчетная (сплошная черная линия) осциллограммы импульса тока разряда ( $I$ ), а также расчетная мощность в разряде (синяя пунктирная линия,  $P$ ). Справа: расчетные импульсы акустического давления на разных расстояниях от оси канала разряда

Из физических представлений понятно, что эффект дробления должен зависеть от градиента давления, а последний зависит от амплитуды и длительности акустического импульса. Поэтому можно ожидать сохранения эффективности дробления даже при снижении электрической емкости генератора импульсов, если при этом амплитуда импульса акустического давления сохраняется. Эти прогнозы подтверждаются данными эксперимента, приведенными в Таблице 1.

## 5. Выводы

Выполнены экспериментальные и численные исследования по снижению емкости высоковольтного накопителя и запасаемой энергии в генераторе для электроимпульсного дробления. При этом решены задачи повышения производительности электроимпульсного дробления и снижения удельных энергозатрат за счет разделения емкостного накопителя на параллельные ветви и реализации параллельной работы двух камер дробления.

Дроблению подвергались сливные кварциты Восточного Саяна с исходным размером кусков около 25 мм. Интересуемый (полезный) размер фракции продукта дробления составлял 100–300 мкм. Получено, что при двукратном снижении емкости накопителя и, соответственно, запасаемой энергии, уменьшилось переизмельчение материала, а выход полезной фракции не сократился. При этом значимо снизились удельные энергозатраты на получение нужной фракции с 230 до 130 кВт·ч/т. Деление накопителя на две ветви и использование двух параллельных разрядов в сравнение с использованием всего накопителя с одним каналом разряда позволил одновременно двукратно снизить удельные энергозатраты на получение нужной фракции и двукратно повысить производительность дробления.

## Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по теме № FWRM-2021-0001.

## 6. Список литературы

- [1] U. Andres, Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses, *Int. J. Miner. Process.*, vol. **97**, 31, 2010, doi: 10.1016/J.MINPRO.2010.07.004
- [2] E. Dal Martello et al., Electrical fragmentation as a novel route for the refinement of quartz raw materials for trace mineral impurities, *Powder Technol.*, vol. **224**, 209, 2012, doi: 10.1016/j.powtec.2012.02.055
- [3] W. Huang, and Y. Chen, The application of high voltage pulses in the mineral processing industry – A review, *Powder Technol.*, vol. **393**, 116, 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.07.003
- [4] A.A. Zherlitsyn, V.M. Alexeenko, E.V. Kumpyak, and S.S. Kondratiev, Fragmentation of printed circuit boards by sub-microsecond and microsecond high-voltage pulses, *Miner. Eng.*, vol. **176**, 107340, 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2021.107340
- [5] V.M. Alexeenko, A.A. Zherlitsyn, and S.S. Kondratiev, Multichannel High Voltage Pulsed Generator for Electro-Discharge Technologies, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. **50**, 3379, 2022, doi: 10.1109/TPS.2022.3172448
- [6] A. Kozyrev, A. Zherlitsyn, and N. Semeniuk, Pulsed high-current discharge in water: adiabatic model of expanding plasma channel and acoustic wave, *Plasma Sci. Technol.*, vol. **24**, 035402, 2022, doi: 10.1088/2058-6272/ac3973