

**INFLUENCE OF THE MODE OF ENERGY INPUT INTO DISCHARGE CHANNEL
ON EFFICIENCY OF CRUSHING OF QUARTZ RAW MATERIALS**

*Andrey Alexeyevich Zherlitsyn^a, Vitaliy Mikhailovich Alexeenko,
Sergey Sergeevich Kondratiev, Aleksey Gennadievich Sitnikov,
Natalya Stepanovna Semeniuk, Andrey Vladimirovich Kozyrev*

Institute of High Current Electronics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Akademicheskyy pr. 2/3,
634055, Tomsk, Russia

^a andzh@oit.hcei.tsc.ru

ABSTRACT

Experimental and numerical studies of the influence of the mode of energy input into the discharge channel on the efficiency of the transformation of electrical energy into mechanical work are carried out. In the experiments, generators with different time constants of the discharge, with a discharge half-period of 0.4–0.9 μs at close levels of stored energy in a high-voltage capacitive storage were used. The quartz material was crushed both after thermal softening and without it. It has been experimentally obtained that the efficiency of crushing quartz raw materials to a fraction of 100–300 μm increases with a decrease in the duration and an increase in the power of the output pulse of the generator. The highest yield of the useful fraction of quartz 100–300 μm was realized on a generator with the lowest time constant of the discharge. To interpret the results obtained, a hydrodynamic model of the expansion of a conducting channel in a liquid was used, taking into account the processes in the discharge circuit of the generator and the plasma kinetics in the discharge channel. The simulation has shown that a decrease in the time of energy input into the discharge channel with an equal stored energy of the generators provides a large compression pressure amplitude in the wave and a shorter pulse duration. Herewith, the total energy in the acoustic pulses in both modes turned out to be approximately equal.

KEYWORDS

Electropulse disintegration; high-current discharge in water; plasma channel.

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ВВОДА ЭНЕРГИИ В КАНАЛ РАЗРЯДА
НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДРОБЛЕНИЯ КВАРЦЕВОГО СЫРЬЯ**

*Андрей Алексеевич Жерлицын^а, Виталий Михайлович Алексеенко,
Сергей Сергеевич Кондратьев, Алексей Геннадьевич Ситников,
Наталья Степановна Семенюк, Андрей Владимирович Козырев*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3

^а andzh@oit.hcei.tsc.ru

АННОТАЦИЯ

Выполнены экспериментальные и численные исследования влияния режима ввода энергии в канал разряда на эффективность дробления кварцевого сырья. В экспериментах использовались генераторы с разной временной постоянной разряда, с полупериодом разряда 0,4–0,9 мкс при близких уровнях запасаемой энергии в высоковольтном емкостном накопителе. Дроблению подвергался кварц как после терморазупрочнения, так и без него. Экспериментально получено, что эффективность дробления кварцевого сырья до фракции 100–300 мкм повышается при уменьшении длительности и повышении мощности выходного импульса генератора. Наибольший выход полезной фракции кварца 100–300 мкм реализован на генераторе с наименьшей временной постоянной разряда. 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. Показано, что уменьшение времени ввода энергии в канал разряда при равном энергозапасе генераторов обеспечивает большую амплитуду давления сжатия в волне и более короткую длительность импульса. При этом полная энергия в акустических импульсах в обоих режимах получилась примерно равной.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Электроимпульсная дезинтеграция; сильноточный разряд в воде; плазменный канал.

Введение

Одним из этапов технологических схем получения кварцевого концентрата 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 продукта, а при дроблении и измельчении химически чистого сырья могут приводить к его загрязнению. На сегодняшний день альтернативой является электроразрядный способ измельчения материалов, руды, отходов производства и потребления [1–17], в котором рабочим инструментом является канал сильноточного разряда в воде, инициируемый высоковольтным импульсом напряжения. При таком способе имеются обоснованные предпосылки к минимизации загрязнения и получению относительно узкого фракционного распределения кварцевого концентрата. Однако для продвижения электроразрядного способа необходимо решать задачу

повышения энергетической эффективности дробления.

В данной работе экспериментально и численно исследовано влияния режима ввода энергии в канал разряда на эффективность дробления кварцевого сырья электроразрядным методом.

1. Схема эксперимента

Схема эксперимента по электроразрядному дроблению кварца показана на рис. 1.

Эксперименты выполнены на трех высоковольтных импульсно-периодических генераторах. Генераторы основаны на схеме импульсной зарядки высоковольтного емкостного накопителя от первичного высоковольтного емкостного накопителя через повышающий импульсный трансформатор и последующей коммутации высоковольтного накопителя с помощью газового разрядника на электродную систему в камере дробления [18]. Разрядная цепь таких генераторов в первом приближении представляет собой простой RLC контур, эквивалентные параметры которого обобщены в табл. 1.

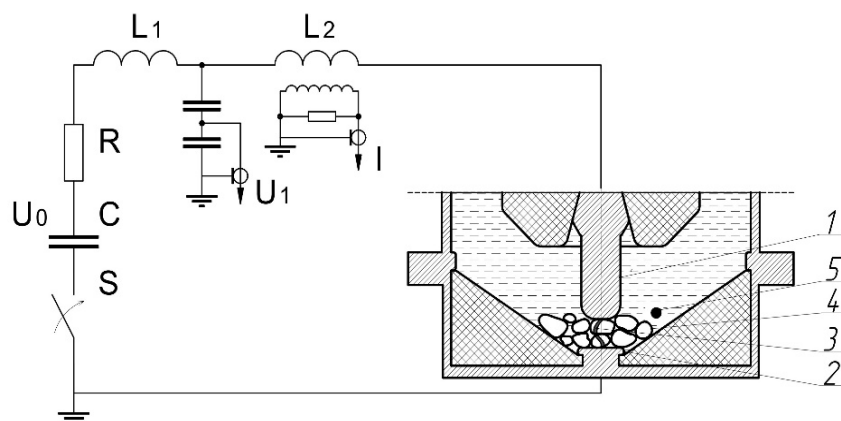


Рис. 1. Схема дробления кварца высоковольтными электрическими импульсами:
 1 – высоковольтный электрод; 2 – заземленный электрод; 3 – канал разряда; 4 – объект разрушения;
 5 – датчик давления; $C, L = (L_1 + L_2), R$ – эквивалентные емкость, индуктивность и сопротивление разрядного контура генератора;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

Fig. 1. Scheme of crushing quartz by high-voltage electrical pulses:
 1 – high-voltage electrode; 2 – grounded electrode; 3 – discharge channel; 4 – object of destruction; 5 – pressure sensor; $C, L = (L_1 + L_2), R$ – equivalent capacitance, inductance and resistance of the generator discharge circuit; U_0 is the charging voltage of the high-voltage capacitive storage

Таблица 1. Параметры генераторов: C – емкость высоковольтного накопителя; U_0 – зарядное напряжение, используемое в экспериментах; E – запасаемая энергия; L, R – эквивалентные индуктивность и сопротивление разрядного контура; I_m – амплитуда тока разряда; $T/2$ – полупериод тока разряда

Table 1. Generator parameters: C is the high-voltage storage capacity; U_0 is the charging voltage used in the experiments; E is the stored energy; L, R are the equivalent inductance and resistance of the discharge circuit; I_m is the amplitude of the discharge current; $T/2$ is half-cycle of the discharge current

№ / No.	U_0 , kV	C , nF	E , J	L , μ H	R , Ohm	I_m , kA	$T/2$, μ s	$(L/C)^{1/2}$, Ohm	$(LC)^{1/2}$, μ s
1	205	8	168	2,4	2,9	7	0,4	17	0,14
2	160	15	192	3,4	1,5	10	0,7	15	0,22
3	90	50	202	1,5	0,3	24	0,9	5	0,27

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 разрядном промежутке; пояс Роговского в камере дробления для регистрации тока разряда; датчик давления PS02-01 (ООО «ГлобалТест»,

г. Саров) для измерения импульсного давления в камере дробления.

Пример осциллограмм тока разряда генераторов приведены на рис. 2. При близких уровнях запасаемой энергии в высоковольтном емкостном накопителе, генераторы позволяют варьировать полупериод тока разряда в ~ 2 раза от 0,4 до 0,9 мкс. Амплитуда тока разряда при этом изменяется от 7 до 24 кА.

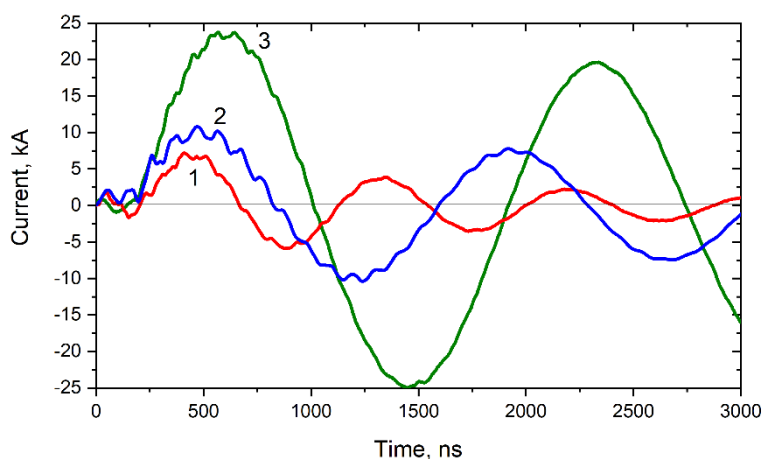


Рис. 2. Осциллограммы тока разряда генераторов № 1–№ 3 из табл. 1

Fig. 2. Waveforms of the discharge current of generators No. 1–No. 3 from Table 1

Камера дробления имеет осесимметричную геометрию с расположением высоковольтного электрода по оси камеры. Диаметр камеры 258 мм. Материал электродов – нержавеющая сталь. Камера дробления заполнялась дистиллированной водой с проводимостью $2 \cdot 10^{-5}$ См/м. Межэлектродный зазор в камере дробления регулируется от 6 мм до 20 мм в зависимости от зарядного напряжения высоковольтного емкостного накопителя. В качестве сырья использовались сливные кварциты Восточного Саяна с исходным размером кусков ~25 мм. Дроблению подвергался кварц как после терморазупрочнения, так и без него.

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.

2. Экспериментальные результаты

Результаты использования генераторов № 1–№ 3 для дробления кварца при фиксированном количестве импульсов приведены в табл. 2 и 3. Данные таблиц показывают, что при равном энергозапасе генераторов эффективность дробления повышается при уменьшении длительности и повышении мощности выходного импульса. Наибольший выход полезной фракции кварца 0,1–0,25 мм реализован на генераторе № 1 с наименьшей временной постоянной разряда $(LC)^{1/2}$.

Таблица 2. Фракционное распределение в процентах от начальной массы при дроблении кварца с предварительным терморазупрочнением

Table 2. Fractional distribution as a percentage of the initial mass during crushing of quartz with preliminary thermal softening

№ / No.	U_0 , kV	Зазор, мм / Gap, mm	Количество импульсов / Number of pulses	Вес фракции в % / Fraction weight in per cent							
				+5 mm	+2 mm	+1,0 mm	+0,5 mm	+0,25 mm	+0,10 mm	+0,05 mm	-0,05 mm
1	205	11	500	0,03	0,17	0,22	3,96	49,00	31,97	6,16	8,49
2	160	8	500	0,75	0,07	0,19	5,34	50,72	26,49	4,67	11,77
3	90	6	500	33,49	1,59	1,27	10,33	34,24	10,67	1,44	6,97

Таблица 3. Фракционное распределение в процентах от начальной массы в различных режимах дробления кварца без предварительного термозаупрочнения

Table 3. Fractional distribution as a percentage of the initial mass in various modes of quartz crushing without preliminary thermal softening

№ / No.	U_0 , kV	Зазор, мм / Gap, mm	Количество импульсов / Number of pulses	Вес фракции в % / Fraction weight in per cent							
				+5 mm	+2 mm	+1,0 mm	+0,5 mm	+0,25 mm	+0,10 mm	+0,05 mm	-0,05 mm
1	205	11	1300	0	0	0	0,68	38,22	40,27	8,85	11,98
2	160	8	1300	0	0	0,04	2,71	32,64	36,25	10,18	18,17
3	90	6	1300	68,24	2,12	1,36	2,43	9,15	5,04	0,85	10,83

Отметим, что результаты дробления электронных печатных плат также демонстрируют преимущества использования более «быстрого» режима разряда [19].

3. 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 [20]. Проведены расчеты генерации и распространения ударных волн в камере

дробления при вариации начальных условий задачи. На рис. 3 показаны рассчитанные профили вкладываемой в канал мощности и динамика расширяющегося канала для двух режимов близких к разряду генераторов № 1 и № 2. Для генератора с длительность первой полуволны около 0,4 мкс импульс тока мы ниже называем «коротким». Для генератора с длительность первой полуволны около 0,7 мкс импульс тока мы ниже называем «длинным». Расчетная вложенная в канал энергия в обоих режимах почти одинакова (на уровне 45 Дж), поэтому и скорости расширения канала также близки.

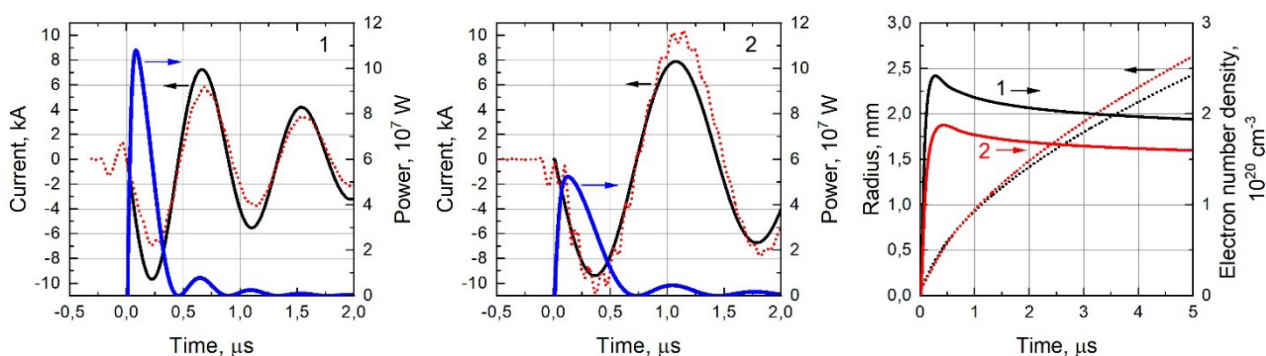


Рис. 3. Расчетные профили выделяемой в канале мощности для генераторов № 1 и № 2 (синие кривые), и временные зависимости радиуса сильноточного канала (штриховые линии) и концентрации электронов (сплошные линии) в нем (справа). Для контроля приведены сравнения рассчитанных (сплошные черные) и экспериментальных (пунктирные линии) профилей тока разряда для генераторов № 1 и № 2

Fig. 3. The calculated profiles of the power released in the channel for generators No. 1 and No. 2 (blue curves), and the time dependences of the radius of the high-current channel (dashed lines) and the electron number density (solid lines) in it (right). For control purposes, comparisons are made between the calculated (solid black) and experimental (dashed lines) discharge current profiles for generators No. 1 and No. 2

На рис. 4 показаны временные развертки акустического сигнала на разных расстояниях от оси камеры дробления для генераторов № 1 и № 2. Как видно, фронт акустического сжатия-разрежения распространяется со скоростью звука, длительность импульса сжатия примерно равна длительности разряда, а интенсивность волны с ростом радиуса постепенно ослабевает.

Максимальная амплитуда давления вблизи сильноточного канала достигает $P_{\max} = 32$ МПа, что позволяет оценить интенсивность: $J_{\max} = P_{\max}^2 / 2\rho c_s \approx 3,4 \times 10^8$ Вт/м², и полную энергию акустического сигнала: $E_{\text{tot}} = J_{\max} \Delta t 2\pi r l \approx 12$ мДж. Здесь $\rho = 10^3$ кг/м³ – плотность воды, $c_s = 1500$ м/с – скорость звука в воде, l – длина искрового канала, r – расстояние от оси, $\Delta t = 0,5$ мкс – длительность импульса на полувысоте.

Результаты моделирования показывают, что «короткий» режим ввода энергии в канал разряда обеспечивает в 2 раза большую амплитуду давления сжатия в волне и во столько же раз меньшую длительность импульса. Поэтому полная энергия в акустическом

импульсе в обоих режимах оказалась примерно равной.

4. Сравнение экспериментальных и расчетных импульсов давления

Представляет интерес сравнение расчетных профилей акустических сигналов на рис. 4 с экспериментально измеренными сигналами с помощью датчика импульсного давления PS0201. В моделировании «длинного» режима разряда амплитуда давления в импульсе заметно ниже, чем у «короткого» режима. Однако в эксперименте (рис. 5) датчик показал примерно одинаковую амплитуду сигнала в разных режимах, и длительность акустического импульса в эксперименте (~5 мкс) оказалась заметно больше, чем в расчете. Возможно, эту расхожимость теории и эксперимента можно объяснить тем, что реальный датчик имеет диаметр $D = 8$ мм. Это может уширить длительность сигнала на величину $\sim D/c_s = 5,3$ мкс. Заметное сглаживание быстрого акустического сигнала в следствии низкой собственной частоты датчика, составляющей 80 кГц, снижает его величину до примерно равной амплитуды.

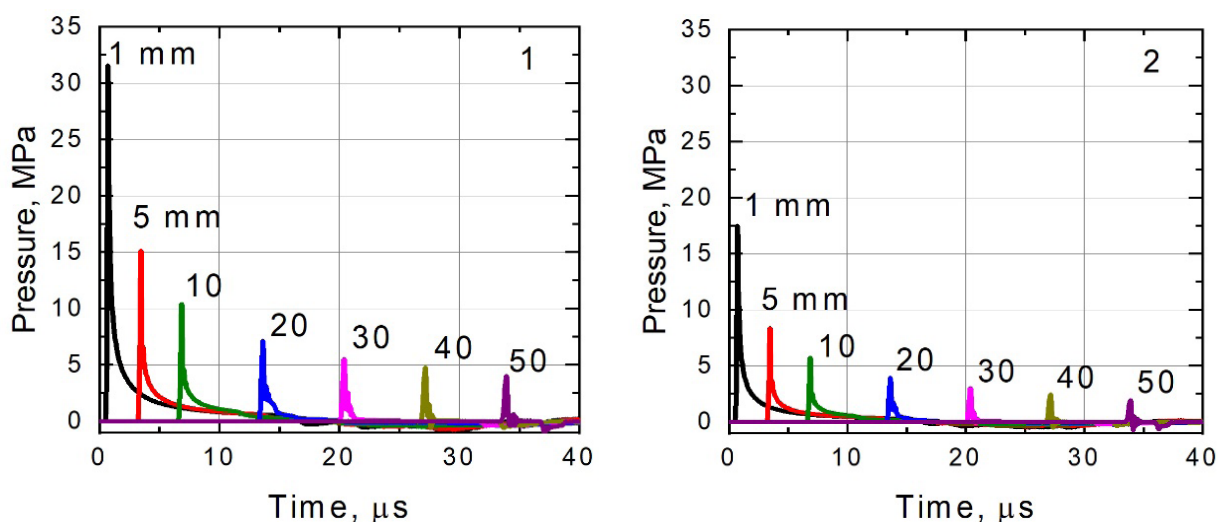


Рис. 4. Расчетные временные профили акустических сигналов

Fig. 4. The calculated time profiles of acoustic signals

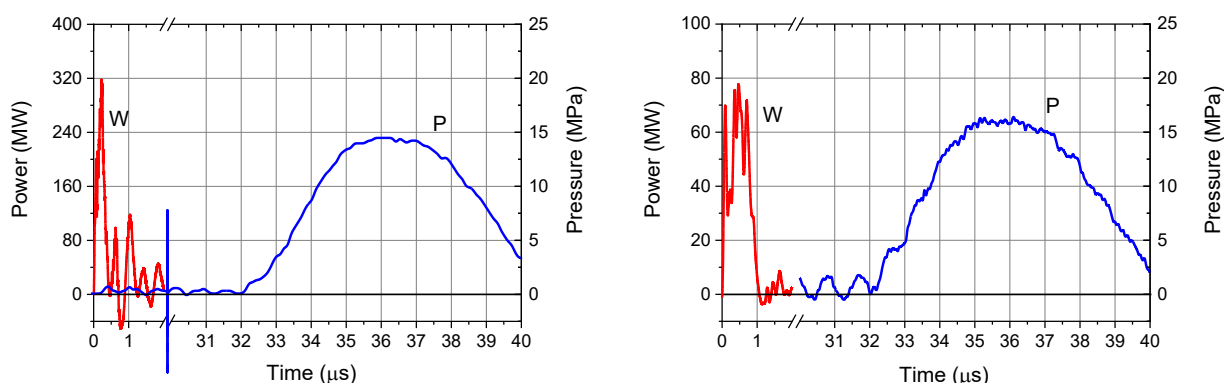


Рис. 5. Экспериментальные осциллограммы мощности в канале W и сигнала с датчика давления P в «коротком» (слева) и «длинном» (справа) режимах разряда

Fig. 5. Experimental waveforms of the power in the channel W and the signal from the pressure sensor P in the “short” (left) and “long” (right) discharge modes

Выводы

Выполнены экспериментальные и численные исследования влияния режима ввода энергии в канал разряда на эффективность трансформации электрической энергии в механическую работу при дроблении кварцевого сырья. Экспериментально получено увеличение эффективности дробления кварца до фракции 100–300 мкм при уменьшении длительности и повышении мощности выходного импульса генератора без изменения запасаемой энергии. В моделировании показано, что более быстрый режим ввода энергии в канал разряда обеспечивает большую амплитуду давления сжатия в акустической волне.

Благодарности / Acknowledgments

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

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on the topic No. FWRM-2021-0001.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dal Martello E., Bernardis S., Larsen R. B., Tranell G., Sabatino M. D., Arnberg L. Electrical fragmentation as

a novel route for the refinement of quartz raw materials for trace mineral impurities // Powder Technology. 2012. V. 224. P. 209–216. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.02.055.

2. Andres U. Development and prospects of mineral liberation by electrical pulses // International Journal of Mineral Processing. 2010. V. 97, Iss. 1–4. P. 31–38. DOI: 10.1016/J.MINPRO.2010.07.004.

3. Wang E., Shi F., Manlapig E. Mineral Liberation by High Voltage Pulses and Conventional Comminution with Same Specific Energy Levels // Minerals Engineering. 2012. V. 27–28. P. 28–36. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.12.005.

4. Linß E., Mueller A. High-performance sonic impulses—an alternative method for processing of concrete // International Journal of Mineral Processing. 2004. V. 74. P. 199–208. DOI: 10.1016/j.minpro.2004.08.016.

5. Bluhm H., Frey W., Giese H., Hoppe P., Schultheiss C., Strassner R. Application of pulsed HV discharges to material fragmentation and recycling // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2000 IEEE. 2000. V. 7, Iss. 5. P. 625–636. DOI: 10.1109/94.879358.

6. Roux M., Eguémann N., Dransfeld C., Thiébaud F., Perreux D. Thermoplastic carbon fibre-reinforced polymer recycling with electrodynamic fragmentation: From cradle to cradle // Journal of Thermoplastic Composite Materials. 2017. V. 30, Iss. 3. P. 381–403. DOI: 10.1177/0892705715599431.

7. Duan C. L., Diao Z. J., Zhao Y. M., Huang W. Liberation of valuable materials in waste printed circuit boards by high-voltage electrical pulses // Minerals Engineering. 2015. V. 70. P. 170–177. DOI: 10.1016/j.mineng.2014.09.018.

8. Martino R., Iseli C., Gaydardzhiev S., Streicher-Porte M., Weh A. Electro dynamic fragmentation of printed wiring boards as a preparation tool for their

recycling // *Minerals Engineering*. 2017. V. 107. P. 20–26. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.01.009.

9. Akimoto Y., Iizuka A., Shibata E. High-voltage pulse crushing and physical separation of polycrystalline silicon photovoltaic panels // *Minerals Engineering*. 2018. V. 125. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.05.015.

10. Nevala S.-M., Hamuyuni J., Junnila T., Sirviö T., Eisert S., Wilson B. P., Serna-Guerrero R., Lundström M. Electro-hydraulic fragmentation vs conventional crushing of photovoltaic panels – Impact on recycling // *Waste Management*. 2019. V. 87. P. 43–50. DOI: 10.1016/j.wasman.2019.01.039.

11. Kang J., Li C., Duan L., Xiao Y., Li A. An Experimental and Numerical Study on the Mechanism of High-Voltage Electro Pulse Rock-Breaking // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023. V. 56. P. 2185–2195. DOI: 10.1007/s00603-022-03154-6.

12. Zhu X., Chen M., Liu W., Luo Y., Hu H. The Fragmentation Mechanism of Heterogeneous Granite by High-Voltage Electrical Pulses // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2022. V. 55. P. 4351–4372. DOI: 10.1007/s00603-022-02874-z.

13. Zhu X., Luo Y., Liu W., H L., Gao R., Jia Y. On the Mechanism of High-Voltage Pulsed Fragmentation from Electrical Breakdown Process // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2021. V. 54. P. 4593–4616. DOI: 10.1007/s00603-021-02537-5.

14. Курец В. И., Усов А. Ф., Цукерман В. А. Электроимпульсная дезинтеграция материалов. Апатиты: Кольский научный центр РАН, 2002. 324 с.

15. Razavian S. M., Rezai B., Irannajad M. Investigation on pre-weakening and crushing of phosphate ore using high voltage electric pulses // *Advanced Powder Technology*. 2014. V. 25, Iss. 6. P. 1672–1678. DOI: 10.1016/j.apt.2014.06.010.

16. Huang W., Chen Y. The application of high voltage pulses in the mineral processing industry – A review // *Powder Technology*. 2021. V. 393. P. 116–130. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.07.003.

17. Dodbiba G., Nagai H., Wang L. P., Okaya K., Fujita T. Leaching of indium from obsolete liquid crystal displays: Comparing grinding with electrical disintegration in context of LCA // *Waste Management*. 2012. V. 32, Iss. 10. P. 1937–1944. DOI: 10.1016/j.wasman.2012.05.016.

18. Kovalchuk B. M., Kharlov A. V., Vizir V. A., Kumpyak V. V., Zorin V. B., Kiselev V. N. High-voltage pulsed generator for dynamic fragmentation of rocks // *Review of Scientific Instruments*. 2010. V. 81, Iss. 10. Article number 103506. DOI: 10.1063/1.3497307.

19. Zherlitsyn A. A., Alexeenko V. M., Kumpyak E. V., Kondratiev S. S. Fragmentation of printed circuit boards by sub-microsecond and microsecond high-voltage pulses // *Minerals Engineering*. 2022. V. 176. Article number 107340. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107340.

20. Kozyrev A., Zherlitsyn A., Semeniuk N. Pulsed high-current discharge in water: adiabatic model of expanding plasma channel and acoustic wave // *Plasma Sci. Technol.* 2022. V. 24. Article number 035402. DOI: 10.1088/2058-6272/ac3973.