

Научная статья
УДК 621.319.53; 537.529; 621.926
doi:10.37614/2949-1215.2024.15.2.009

ПОЛУЧЕНИЕ ПОРОШКОВ СИНТЕТИЧЕСКОГО КВАРЦА ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫМ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕМ

**Андрей Александрович Климов¹, Виталий Валентинович Колобов²,
Александр Сергеевич Потокин³**

^{1, 2}Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия

³«Технологии электроимпульсной дезинтеграции материалов», Апатиты, Россия

¹a.klimov@ksc.ru

²v.kolobov@ksc.ru

³electric.pulse@mail.ru

Аннотация

В работе рассматривается эффективность разрушения искусственных кристаллов кварца, выращенных гидротермальным методом. Приводятся данные по удельным энергетическим затратам на разрушение с помощью электроимпульсного и электрогидравлического воздействий. Показано, что при доведении кварцевого материала до размеров менее 1 мм электроимпульсным воздействием в полезную фракцию менее 0,5 мм переходит более 60 % продукта по массе. При этом снижение прикладываемого напряжения приводит к повышению средней крупности продукта. В экспериментах по дальнейшему доизмельчению материала больше 0,5 мм электрогидравлическим воздействием было выявлено, что эффективность разрушения кварца при данном методе зависит в большей степени не от энергии в импульсе, а от скорости ее выделения, и для повышения производительности процесса необходимо применять разряды с высокой бризантностью.

Ключевые слова:

электрофизическое воздействие, электрогидроимпульсное разрушение, электроимпульсное разрушение, искусственный кварц

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Original article

PRODUCTION OF SYNTHETIC QUARTZ POWDERS BY ELECTRIC DISCHARGE FRAGMENTATION

Andrey A. Klimov¹, Vitalii V. Kolobov², Aleksandr S. Potokin³

^{1, 2}Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia

³Technologies of Electro-pulse Disintegration of Materials, Apatity, Russia

¹a.klimov@ksc.ru

²v.kolobov@ksc.ru

³electric.pulse@mail.ru

Abstract

The paper considers the efficiency of destruction of artificial quartz crystals synthesized by hydrothermal method. The data on specific energy consumption for destruction by means of electric pulse and electrohydraulic impacts are given. It is shown that when quartz material fractured to the size of less than 1 mm by electric pulse impact more than 60% of the product by mass corresponds to the useful fraction of less than 0.5 mm. At the same time reduction of the applied voltage leads to an increase in the average product coarseness. In experiments on further additional fragmenting of material larger than 0.5 mm by electrohydraulic impact it was revealed that the efficiency of quartz destruction by this method depends, to a greater extent, not on the pulse energy, but on the rate of energy release, and to increase the productivity of the process it is necessary to use discharges with high brisance.

Keywords:

electrophysical impact, electro-hydraulic fragmentation, high-voltage pulse fragmentation, artificial quartz

Acknowledgments:

This work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

Введение

Природные и искусственные образцы кварца могут применяться как в виде цельных обработанных изделий, так и в виде измельченного продукта в различных областях деятельности человека, включая электронику, оптику, строительство, медицину, керамическую промышленность. Кварц может использоваться и в качестве абразивного материала, поскольку обладает показателем твердости 7 по шкале Мооса, что ставит его на один уровень с другим природным абразивом — гранатом. Увеличение потребности в кварце также обусловлено разрастанием производства солнечных панелей из-за тенденции перехода большинства стран к возобновляемым источникам энергии. Однако практически в каждой из этих областей применения неуклонно возрастают требования к химической чистоте кварцевого материала и совершенству его структуры. Особой чистотой отличаются синтетические кристаллы кварца, получаемые гидротермальным синтезом — выращиваемые из водного раствора оксида при высоких температурах и давлении [1]. Чаще всего для непосредственного использования такого чистого кварца, например, в случае изготовления кварцевых стёкол с высокой оптической прозрачностью, необходимо его измельчение до фракций требуемого размера.

Механическое дробление кварца, являющееся начальной стадией производства чистого минерального материала, сопряжено с образованием пыли и внесением в продукт очень мелкого помола аппаратного металла, что требует введения ступеней магнитной сепарации и кислотного выщелачивания для получения высококачественной кварцевой крупки или пыли. Электрофизические методы разрушения, в отличие от механического измельчения, лишены данных недостатков, поскольку рабочим органом в них является высокоэнергетический электрический разряд, а воздействие на материал производится в водной среде. Проводимые ранее исследования в этой области были, в основном, сосредоточены на селективном дроблении природных кристаллов кварца и их очистке от примесей [2], а также на получении зерен заданной формы и определенного фракционного состава [3]. Результаты этих работ показывают высокую эффективность электрогидравлического разрушения природного кварца, имеющего в своей структуре множество дефектов и включений. Автором работы [4] показано, что при электроразрядном разрушении кварца не происходит изменения его структурных свойств и свойств системы «вода — минерал» под действием высокотемпературной плазмы, что также говорит о потенциале применения предлагаемых технологий.

Однако практически отсутствуют данные о разрушении разрядами синтетических монокристаллов. В связи с этим в ЦЭС КНЦ РАН были проведены экспериментальные исследования дробления и измельчения образцов искусственного кварца с помощью электроимпульсного и электрогидравлического воздействий до фракций менее 500 мкм и проанализирована эффективность примененных методов.

Экспериментальная часть

В экспериментах по электрофизическому разрушению кварца были задействованы три схемных решения высоковольтных генераторов:

- 1) генератор импульсных напряжений (ГИН) 315/0,028 из 7 ступеней с запасаемой в накопителях энергией до 1,4 кДж и амплитудой напряжения до 315 кВ (рис. 1, а);
- 2) генератор импульсных токов (ГИТ) 48/0,76 с максимальным напряжением в разряде 48 кВ и энергией 876 Дж (рис. 1, б);
- 3) 2-ступенчатый генератор ГИН 96/0,19, составленный из тех же конденсаторов, что и ГИТ 48/0,76, и обладающий той же энергией в импульсе, но создающий импульсы с амплитудой 96 кВ (рис. 1, в).

В таблице 1 приведены основные энергетические параметры созданных генераторов. Схема ГИН 315/0,028 была задействована в опытах с максимальным напряжением и со сниженным практически в 2 раза для выявления влияния амплитуды импульса на фракционные характеристики измельченного кварца. ГИН 96/0,19 представлял собой перестроенный ГИТ 48/0,76 с добавленными

для разделения ступеней зарядными резисторами и задающим разрядником. Энергия в импульсе двух этих генераторов оставалась одинаковой, однако при перестройке изменялся характер импульсного воздействия на разрушаемый материал, что будет показано далее.

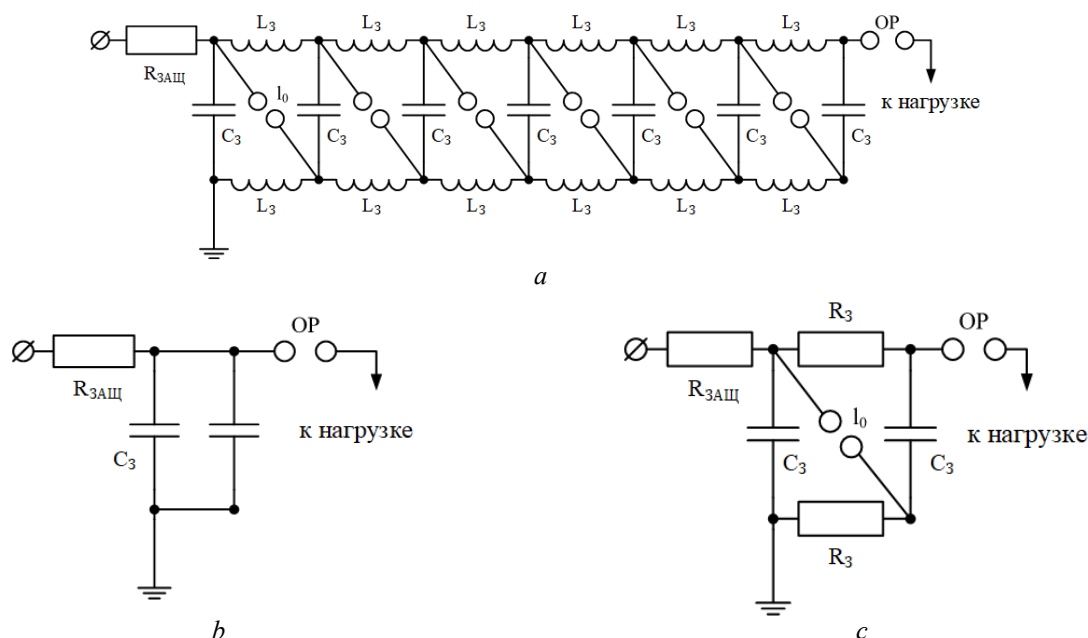


Рис. 1. Установки для осуществления электрофизического воздействия на кварц:

a — ГИН 315/0,028; *b* — ГИТ 48/0,76; *c* — ГИН 96/0,19; I_0 — задающий разрядник;

ОП — отделительный разрядник; $R_{ЗАЩ}$ — защитное сопротивление; C_3 — зарядная емкость;

L_3 — зарядная индуктивность; R_3 — зарядное сопротивление

Fig. 1. Shapes, surface features and defects of synthetic quartz samples:

a — pulse voltage generator (PVG) 315/0,028; *b* — pulse current generator (PCG) 48/0,76; *c* — PVG 96/0,19;

$R_{ЗАЩ}$ — current-limiting resistance; I_0 — initiating spark gap; ОП — separating spark gap;

C_3 — charging capacitance; L_3 — charging inductance; R_3 — charging resistance

Таблица 1

Энергетические параметры примененных генераторов
Energy parameters of the applied generators

Тип генератора	ГИН 320/0,028		ГИТ 48/0,76	ГИН 96/0,19
Напряжение в импульсе, кВ	320	168	48	96
Емкость в разряде, мкФ	0,028	0,028	0,76	0,19
Максимальная энергия в импульсе, Дж	1418	403	876	876

Для осуществления полного цикла дробления и измельчения с целью доведения образцов до крупности менее 0,5 мм был использован процесс, состоящий из двух этапов:

- электроимпульсное дробление больших кусков кристаллов с помощью ГИН 315/0,028 до крупности менее 1 мм;
- дальнейшее электрогидравлическое измельчение нераздробленного материала и части продукта с предыдущего этапа с помощью ГИТ 48/0,76 и ГИН 96/0,19.

Конструкция дробильно-измельчительных камер, в которых осуществлялось электрофизическое воздействие, подробно описана в работах [5; 6], а на рис. 2 обозначены лишь основные элементы этих камер. Во всех экспериментах воздействие на кварц производилось в очищенной методом обратного осмоса воде с удельной проводимостью порядка 15 мкСм/см.

Крупнокусовое разрушение кристаллов проводилось методом электроимпульсной дезинтеграции с помощью ГИН 315/0,028 в большой измельчительной камере (БИК, рис. 2, *a*). Рабочим органом камеры являлась электродная пара с конфигурацией «остриё — полусфера», в промежутке которой происходил высоковольтный пробой дробимого кварца при подаче на рабочие электроды импульсов с длительностью фронта около 160–170 нс. Потенциальный электрод представлял собой заостренный стальной стержень, закрепленный внутри проходного изолятора. Металлические сита-классификаторы полусферической формы являлись заземленным электродом. В процессе работы генератора кремнезем удалялся из зоны дробления при достижении размеров меньше диаметра отверстий сита и скапливался в баке для продукта. Разрушение твердого тела происходило как за счет работы расширения образовавшегося при пробое тела канала разряда, так и за счет ударных волн, распространяющихся в толще материала и жидкой среде.

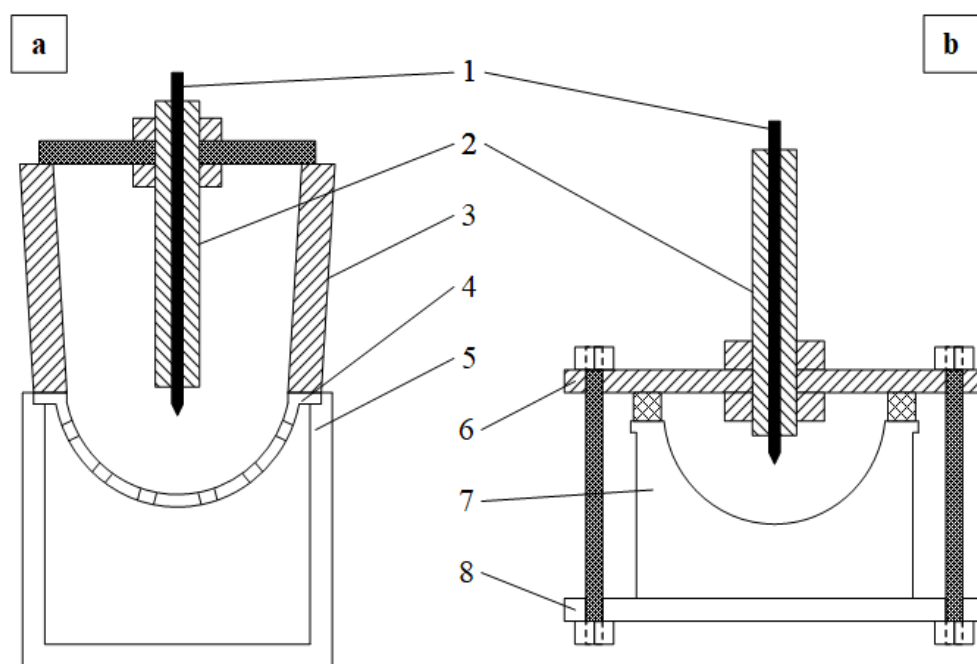


Рис. 2. Камеры для крупнокусового дробления и измельчения синтетических кристаллов:
a — большая измельчительная камера; *b* — малая измельчительная камера; 1 — высоковольтный электрод;
2 — проходной изолятор; 3 — полиэтиленовый корпус; 4 — заземленное сито-классификатор; 5 — бак для сбора
продукта; 6 — полиэтиленовая пластина; 7 — заземленная стальная чаша; 8 — металлическая пластина

Fig. 2. Vessels for coarse crushing and fragmenting of synthetic crystals:
a — large fragmenting vessel; *b* — small fragmenting vessel; 1 — high-voltage electrode;
2 — bushing insulator;
3 — polyethylene housing; 4 — grounded sieve; 5 — product collection tank; 6 — polyethylene plate;
7 — grounded steel bowl; 8 — metal plate

В экспериментах по разрушению с помощью электрогидравлического воздействия при работе ГИТ 48/0,76 и ГИН 96/0,19 использовалась малая измельчительная камера (МИК, рис. 2, *b*). Для осуществления высоковольтного пробоя водного промежутка с измельчаемой породой применялась система электродов с конфигурацией «остриё — чаша». В качестве потенциального электрода использовался заостренный латунный стержень. Вторым электродом, установленным на заземленную металлическую пластину, являлся цельный стальной цилиндр с глубокой полусферической выемкой в верхней части. В отличие от БИК, камера МИК сверху была закрыта полиэтиленовой пластиной, к которой стальная чаша прижималась через изоляционную прокладку. Таким образом обеспечивалась герметизация зоны разрушения для

предотвращения выброса материала из камеры при возникновении гидроудара от пробоя воды. При электрогидравлическом воздействии был невозможен пробой дробимого кварца, и разрушение происходило за счет воздействия прямых и отраженных ударных и акустических волн, генерируемых разрядом в водных прослойках между частицами материала.

В качестве образцов для разрушения использовались крупные цельные кристаллы синтетического кварца, выращенные гидротермальным методом и отбракованные при производстве из-за дефектов структуры (рис. 3). Образцы содержали в себе фрагменты проволоки для крепления заправки, которые располагались в толще кристаллов вдоль малых торцов. Геометрические параметры и масса образцов указаны в табл. 2.



Рис. 3. Формы, особенности поверхности и дефекты образцов синтетического кварца
Fig. 3. Shapes, surface features and defects of synthetic quartz samples

Таблица 2

Характеристики кристаллов кварца
Characteristics of quartz crystals

№ образца	Максимальный размер, см	Толщина, см	Объем, см ³	Масса, г
1	19	4,0	689	1791
2	22	4,4	660	1717

Большие плоскости образца № 1 были покрыты небольшими выпуклыми образованиями — подобная бугристость не наблюдается у природных кристаллов. Образец имел крупную трещину по центру, проходящую до середины образца от края до края торцевых плоскостей. Другая трещина проходила от одного из торцов через верхнюю большую плоскость и не доходила до противоположного торца. Однако ограниченный данными дефектами фрагмент не отделялся от основной части образца. Все плоские поверхности кристалла были оптически прозрачны.

Самые большие поверхности образца № 2 также были покрыты образованиями, но они были крупнее, чем у образца № 1. Образец не имел видимых дефектов; почти все его плоскости, за исключением одной, были прозрачны. Непрозрачная плоскость была образована срезом или спилом, сделанным абразивным материалом.

Средняя крупность продукта рассчитывалась как средневзвешенный размер частиц из диапазонов размеров, полученных после ситования на лабораторных ситах со следующими размерами ячеек: 15; 10; 5; 4,2; 3; 2; 1; 0,5; 0,25 мм. Степень дробления определялась как отношение средней крупности исходной навески кварца к средней крупности полученного продукта.

Результаты и обсуждение

Первоначальные опыты по высоковольтному пробоем рассмотренных образцов искусственного кварца в электродной системе «острие — острие» показали, что в системе с таким уровнем неоднородности поля для внедрения разряда даже в дефектный кристалл при длине межэлектродного промежутка 40÷44 мм требуются напряжения выше 315 кВ при длительности фронта импульса порядка 160÷170 нс, либо необходимо использование жидкости с большей электрической прочностью.

В экспериментах с обоими образцами разряд прошел по поверхности материала, последствия перекрытия показаны на рис. 4. Однако напряженности в системах «остриё — сито» и «остриё — чаша» выше, чем в системе «остриё — остриё», а разряды при электроимпульсном воздействии имели возможность развиваться по уже появившимся в структуре материала дефектам. Поэтому дробление в БИК происходило по большей части с пробоем материала.

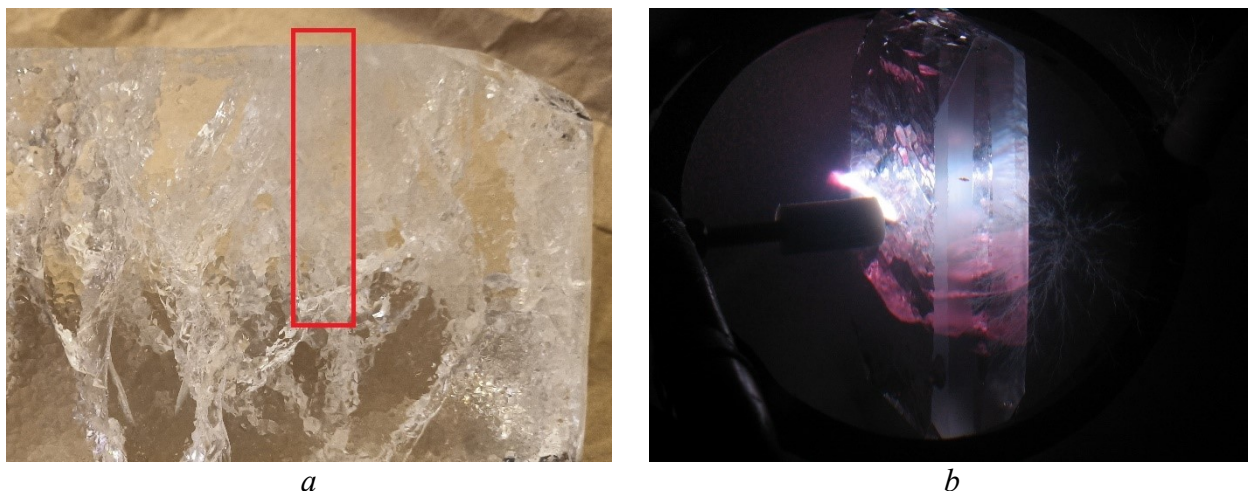


Рис. 4. Иллюстрации прохождения канала разряда по поверхности образцов кварца:

a — след от канала разряда на образце № 1; *b* — фотография поверхностного разряда на образце № 2

Fig. 4. Illustrations of a discharge channel passing over the surface of quartz samples:

a — trace of the discharge channel on sample no. 1; *b* — photograph of the surface discharge on sample no. 2

Оба образца были разрушены на 2÷4 крупных куска образовавшейся от канала разряда ударной волной. На рис. 4, *a* можно рассмотреть расходящиеся в толще кристалла от торца, по которому прошел канал, многочисленные мелкие трещины, далее переходящие в крупные разломы по всему объему образца. Также под правым торцом можно выделить такие же мелкие разветвленные трещины, образованные внутренним отражением части ударной волны от торца образца. О разрушениях подобного рода сообщалось в работе [7], посвященной изучению распространения трещин в цементных образцах при электрогидравлическом воздействии на них.

В исследованиях по электроимпульсному дроблению горных пород и абразивных материалов в электродной системе с потенциальным остриём и заземленным ситом-классификатором, проводившихся ранее в ЦЭС КНЦ РАН, задействовались сита с ячейками 15, 5, 2 и 1 мм последовательно [8]. Эксперименты с кремнеземом показали, что из-за его крайне высокой хрупкости возможно увеличение степени дробления за одну стадию без критического роста удельных энергозатрат по сравнению с другими рассмотренными материалами. Поэтому эксперименты с кристаллами кварца осуществлялись последовательно на классификаторах 15 и 1 мм.

Разрушение образцов кварца проводилось при двух уровнях выходного напряжения ГИН и энергиях в импульсе соответственно: образца № 1 при 315 кВ (1418 Дж в импульсе) и образца № 2 при 168 кВ (403 Дж в импульсе). При одной и той же длине рабочего промежутка в 50 мм осциллограммы напряжения и тока на нагрузке имели значительные отличия (рис. 5): так, при воздействии напряжения 315 кВ пробой происходил после задержки около 1,5 мкс в среднем и величина развиваемого тока через образованный канал составляла порядка 8–10 кА, тогда как при воздействии напряжения 168 кВ средняя задержка пробоя увеличилась до 3,2 мкс, а развиваемый ток в контуре нагрузки снизился до величины 4–5 кА.

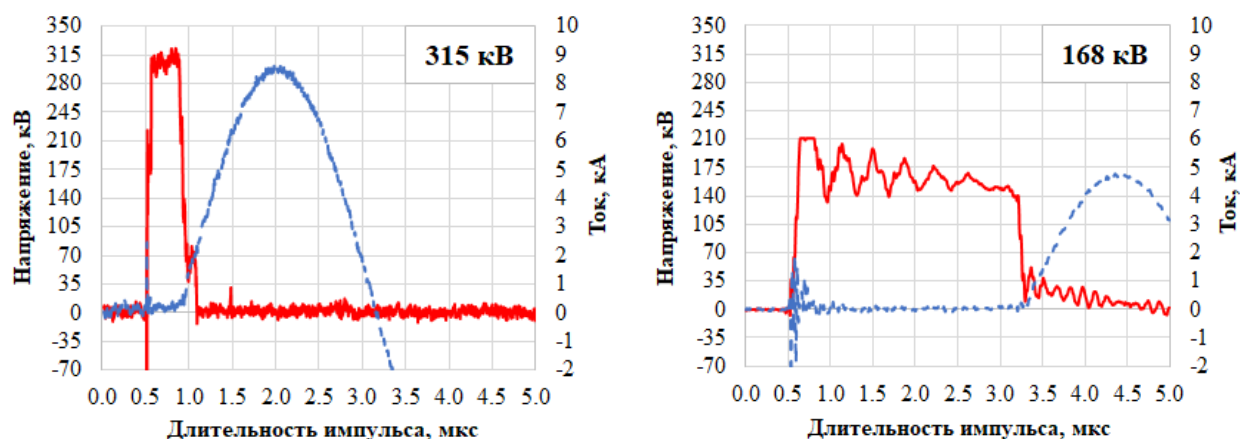


Рис. 5. Осциллограммы пробоя промежутка 50 мм в большой измельчительной камере с помощью ГИН 315/0,028 при 315 и 168 кВ: сплошная линия (красная) — напряжение; пунктирная линия (синяя) — ток
Fig. 5. Oscillograms of 50 mm gap breakdown in large fragmenting vessel using PVG 315/0.028 at 315 and 168 kV: solid line (red) — voltage; dashed line (blue) — current

На рисунке 6 показаны кривые обратного кумулятивного распределения фракций продукта электроимпульсного дробления образцов кварца на сите с ячейками 15 мм, а в табл. 3 представлены некоторые показатели дробления. Как можно рассмотреть из рисунка, снижение напряжения воздействия ГИН привело к приближению фракционного распределения к более равномерному виду и повышению крупности конечного продукта: так, при уменьшении напряжения воздействия в 1,8 раза средняя крупность продукта дробления увеличилась практически на 25 %. Удельные энергозатраты на электроимпульсное разрушение образцов кварца № 1 и № 2 до размера менее 15 мм составили около 8 и 5 кВт·ч/т соответственно, что сравнимо с таковыми для абразивных материалов из электрокорунда (около 7 кВт·ч/т) [8]. Данное обстоятельство можно связать с малой прочностью кварца на разрыв, которая в десятки раз меньше его прочности на сжатие [9]. По этой же причине были получены довольно высокие степени дробления от 10 до 18 раз за стадию. Однако синтетический кварц также подчиняется общей тенденции увеличения энергоемкости разрушения с уменьшением размера измельчаемого материала из-за снижения вероятности внедрения разряда в частицы минерала. При переходе от сита с ячейками 15 мм на сито с ячейками 1 мм при неизменных энергетических параметрах воздействия энергоемкость разрушения для обоих уровней напряжения возросла в 9–11 раз. Но о высокой эффективности электроимпульсного разрушения говорит массовое содержание фракции менее 0,5 мм в продукте дробления после сита 1 мм, которое достигло 66 и 63 % для уровней напряжения 315 и 168 кВ соответственно.

Для опытов по дальнейшему электрогидравлическому измельчению и получению дополнительного выхода фракций кварца менее 0,5 мм использовались нераздробленный материал образца № 2 с сита 1 мм фракции $-4,2 + 1$ мм и часть продукта дробления после данного сита фракции $-1 + 0,5$ мм. Собранный материал был разделен на три навески с одинаковым фракционным распределением и массой по 320 г. Средняя крупность полученных навесок составила 1,35 мм.

На рисунке 7 изображены осциллограммы электрического пробоя при воздействии ГИТ 48/0,76 и ГИН 96/0,19 на промежуток 20 мм с навесками мелкозернистых фракций кварца в МИК. При работе обеих установок на навески было подано по 100 импульсов с суммарным энерговыделением 87,6 кДж. Развиваемый при разряде обоими генераторами ток достигал одной и той же максимальной величины в 14 кА, поскольку энергетические параметры схемы не изменились при переходе от ГИТ к ГИН. Однако можно заметить, что при разряде ГИН ток имеет вдвое большую скорость нарастания, что определяет высокую бризантность расширяющегося канала от воздействия ГИН 96/0,19.

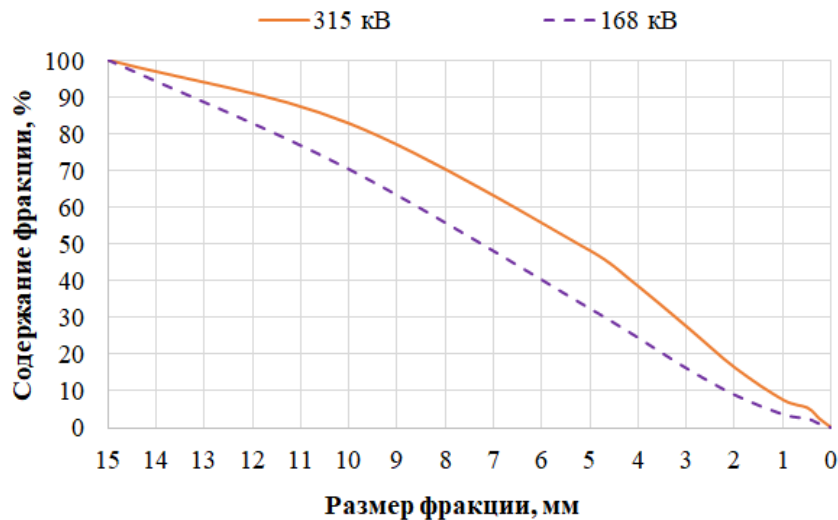


Рис. 6. Обратные кумулятивные фракционные распределения кварцевого продукта после дробления с помощью ГИН 315/0,028
Fig. 6. Inverse cumulative particle size distributions of quartz product after crushing with PVG 315/0.028

Таблица 3

Показатели электроимпульсного дробления кристаллов кварца
Rates of electric pulse crushing of quartz crystals

Показатель	Образец № 1, 315 кВ		Образец № 2, 168кВ	
Размер ячеек сит, мм	15	1	15	1
Удельные энергозатраты, кВт·ч/т	7,7	65,6	5,2	55,9
Содержание фракции -0,5 мм в продукте, %	5,4	66,4	2,5	63,4
Степень дробления	12,5	15,8	10,0	18,1
Средний размер продукта, мм	6,01	0,41	7,48	0,43

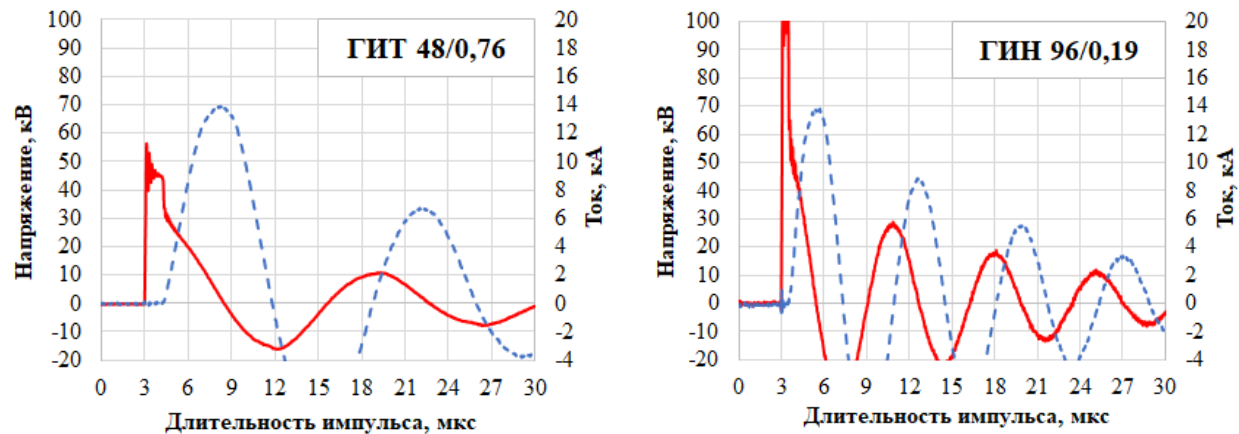


Рис. 7. Осциллограммы пробоя промежутка 20 мм в малой измельчительной камере с помощью ГИТ 48/0,76 и ГИН 96/0,19: сплошная линия (красная) — напряжение; пунктирная линия (синяя) — ток
Fig. 7. Oscillograms of the breakdown of a 20 mm gap in a small fragmenting vessel using PCG 48/0.76 and PVG 96/0.19: solid line (red) — voltage; dashed line (blue) — current

При одинаковых суммарных энергетических затратах, неизменяемой длине рабочего промежутка в МИК, энергокладе в импульсе, начальной крупности и массе навесок для измельчения воздействие ГИН 96/0,19 оказалось более эффективным в плане измельчения, чем разрушение с помощью ГИТ 48/0,76 (рис. 8 и табл. 4). Особенностью действия ГИТ явилось то, что продукт приобрел фракционное распределение, близкое к нормальному со средним значением крупности 1,31 мм, тогда как средняя крупность продукта после воздействия 2-ступенчатого ГИН оказалась на 36 % меньше. После подачи 100 импульсов от ГИН 96/0,19 на навеску кварца во фракцию менее 0,5 мм перешло 36 % массы материала, тогда как для ГИТ 48/0,76 этот показатель составил лишь около 7 %. Всё это говорит о лучшем распределении давления ударной волны при быстром энергокладе в канал разряда и более эффективной утилизации энергии разряда ГИН 96/0,19.

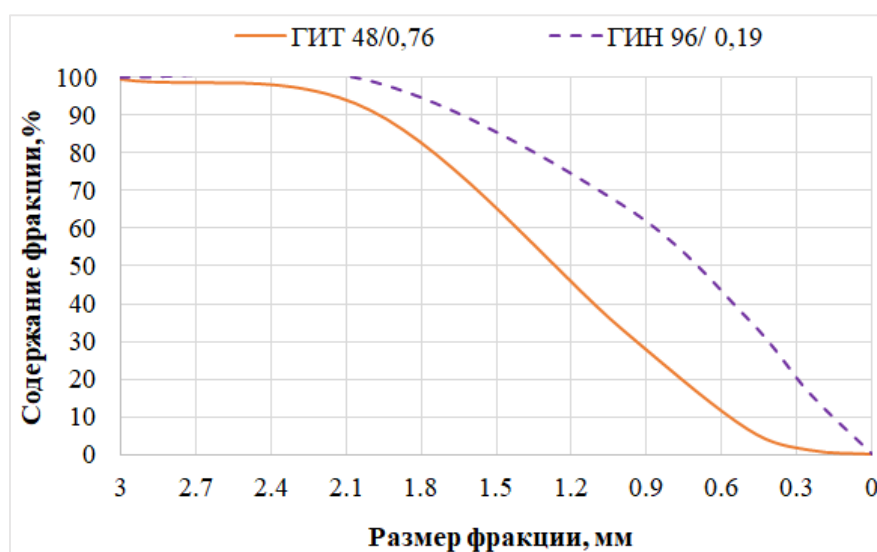


Рис. 8. Обратные кумулятивные фракционные распределения кварцевого продукта после измельчения ГИТ 48/0,76 и ГИН 96/0,19

Fig. 8. Inverse cumulative particle size distributions of quartz product after fragmenting with PCG 48/0.76 and PVG 96/0.19

Таблица 4

Показатели электрогидравлического разрушения кристаллов кварца
Rates of electrohydraulic fracturing of quartz crystals

Показатель	ГИТ 48/0,76	ГИН 96/0,19
Удельные энергозатраты, кВт·ч/т	76	76
Содержание фракции <0,5 мм в продукте, %	6,7	36,2
Степень дробления	1,0	1,6
Средний размер продукта, мм	1,31	0,84

На рисунке 9 представлено изображение фракции <0,5 + 0,25 мм, выделенной из продукта измельчения после экспериментов с ГИН 96/0,19. Одной из особенностей электрогидравлического воздействия на кварц явилось то, что получаемые фрагменты малых фракций имеют округлую форму, и данный продукт может считаться окатанным кварцем, пригодным для производства стекла и керамики. Фрагменты тех же фракций после электроимпульсного воздействия чаще обладали пластинчатой и многоугольной формой, и такой кварц может быть использован в качестве абразивного материала.



Рис. 9. Фракция продукта измельчения кварца $-0,5 + 0,25$ после экспериментов с ГИН 96/0,19
Fig. 9. Fraction of quartz fragmenting product $-0.5 + 0.25$ after experiments with PVG 96/0.19

Заключение

Исходя из литературных данных, при разрушении кристаллов кварца с помощью их непосредственного пробоя необходимо приложение достаточно высокого напряжения — порядка 300 кВ для образцов толщиной 45–50 мм — для создания сквозного канала разряда в них. Материал кварца, хотя и характеризуется высокой твердостью, является достаточно хрупким, что обуславливает его подверженность разрушению с распространением длинных и разветвленных трещин по всему объему при воздействии проходящей в его толще ударной волны от пробоя. По образованным дефектам уже может развиваться канал разряда при меньших напряжениях воздействия. Количество вложенной в канал энергии также влияет на степень разрушения крупных кристаллов, что связано с размером зоны первичного ударного воздействия вокруг канала и скоростью затухания распространяющейся в материале волны. Этими факторами объясняется увеличение крупности продукта измельчения при снижении выходного напряжения ГИН 315/0,028.

Однако по мере уменьшения крупности дробимых навесок кварца на степень измельчения уже начинает влиять не столько уровень напряжения и количество энергии, сколько скорость ее выделения, поскольку для мелких кристаллов вероятность внедрения разряда в их объем снижается, и ведущую роль в разрушении начинает играть ближайшая к каналу разряда зона ударного разрушения, что объясняет уменьшение крупности разрушенных кристаллов при переходе от ГИТ к ГИН в экспериментах по дроблению мелких фракций без удаления материала из зоны воздействия.

Опыты по изучению разрушения кварца при использовании электроимпульсного и электрогидравлического воздействия показали, что данные методы обладают довольно высокой эффективностью и имеют ряд достоинств по сравнению с традиционным механическим воздействием. Однако оптимизация процесса разрушения требует проведения дальнейших исследований.

Список источников

1. О'Доноху М. Кварц: пер. с англ. М.: Мир, 1990. 136 с.
2. Кусаинов К. Импульсные технологии и получение наноструктурированных материалов // Вестник Карагандинского университета. Серия «Физика». 2010. № 4 (60). С. 24–30.
3. Electrical fragmentation as a novel route for the refinement of quartz raw materials for trace mineral impurities / E. D. Martello [et al.] // Powder Technology. 2012. V. 224. P. 209–216. DOI: 10.1016/j.powtec.2012.02.055.
4. Лобанова Г. Л. Изменение свойств минералов при электроимпульсном разрушении // Физика горных пород и процессов. Сборник трудов. Томск: Издательство ТПИ, 1974. С. 41–45.
5. Potokin A. S. Effectiveness evaluating of the use electric pulse comminution method in combined technology of slag dump copper-nickel production refining // IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress, Moscow, 17–21 сентября 2018 года. Moscow: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2019. P. 2963–2968.
6. Потокин А. С., Климов А. А., Колобов В. В. Исследование горных пород с обогатительных комбинатов Мурманской области на лабораторном образце электроимпульсной дезинтеграционной установки // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 97–110. DOI:10.37614/2949-1215.2022.13.3.010.
7. Experimental and numerical study on the effect of electrohydraulic shock wave on concrete fracturing / Q. Yu [et al.] // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2022. Vol. 215, Part B. 110685. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110685.
8. Селиванов В. Н., Климов А. А. Разрушение твердых композиционных отходов импульсами высокого напряжения // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 79–86. DOI:10.37614/2949-1215.2022.13.3.008.
9. Quartz Glass Property // (@MICQ) SHANGHAI WECHANCE INDUSTRIAL CO., LTD. Shaghai, 2010. URL: <https://www.micquartz.com/quartz-glass-property/> (дата обращения: 30.05.2024).

References

1. O'Donoghue, M. *Kvarts* [Quartz]. Moscow, Mir, 1990, 136 p. (In Russ.).
2. Kusaïnov K. *Impul'snye tekhnologii i poluchenie nanostrukturirovannykh materialov* [Pulse technologies and production of nanostructured materials]. *Vestnik Karagandinskogo universiteta. Seriya "Fizika"* [Bulletin of Karaganda University. Series "Physics"], 2010, no. 4 (60), pp. 24–30. (In Russ.).
3. Martello E. D., 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, Vol. 224, pp. 209–216. DOI:10.1016/j.powtec.2012.02.055.
4. Lobanova G. L. *Izmenenie svoystv mineralov pri elektroimpul'snom razrushenii* [Change of minerals properties at electric pulse destruction]. *Fizika gornykh porod i processov. Sbornik trudov* [Physics of Rocks and Processes. Collection of works]. Tomsk, TPI Publishing House, 1974, pp. 41–45. (In Russ.).
5. Potokin A. S. Effectiveness evaluating of the use electric pulse comminution method in combined technology of slag dump copper-nickel production refining. *IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress*, Moscow, September 17–21, 2018. Moscow, Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2019, pp. 2963–2968.
6. Potokin A. S., Klimov A. A., Kolobov V. V. *Issledovanie gornykh porod s obogatitel'nykh kombinatov Murmanskoy oblasti na laboratornom obrazce elektroimpul'snoj dezintegratsionnoy ustanovki* [Research of rocks from mining plants of Murmansk region on a laboratory sample of electric pulse disintegration installation]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences], 2022, vol. 13, no. 3, pp. 97–110. (In Russ.). DOI:10.37614/2949-1215.2022.13.3.010.

7. Yu Q., Zhang H., Yang R., Cai Z., Liu K. Experimental and numerical study on the effect of electrohydraulic shock wave on concrete fracturing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, Vol. 215, Part B, 110685. DOI: 10.1016/j.petrol.2022.110685.
8. Selivanov V. N., Klimov A. A. *Razrushenie tvyordyh kompozicionnyh othodov impul'sami vysokogo napryazheniya* [Fracturing of solid composite waste with high voltage pulses]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences], 2022, vol. 13, no. 3, pp. 79–86. (In Russ.). DOI:10.37614/2949-1215.2022.13.3.008.
9. Quartz Glass Property. (@MICQ) SHANGHAI WECHANCE INDUSTRIAL CO., LTD. Shaghai, 2010. Available at: <https://www.micquartz.com/quartz-glass-property/> (accessed 30.05.2024).

Информация об авторах

А. А. Климов — младший научный сотрудник;

В. В. Колобов — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник;

А. С. Потокин — генеральный директор ООО «ТЕХЭДМ».

Information about the authors

A. A. Klimov — Junior Researcher;

V. V. Kolobov — PhD (Engineering), Leading Researcher;

A. S. Potokin — General Director of LLC “TEHEDM”.

Статья поступила в редакцию 24.05.2024; одобрена после рецензирования 04.06.2024; принята к публикации 06.06.2024.
The article was submitted 24.05.2024; approved after reviewing 04.06.2024; accepted for publication 06.06.2024.