

Перспективы получения мелкодисперсных порошков с помощью импульсного электрического разряда в жидкости

© Ю.Ю. Инфимовский, М.А. Строков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены механизмы измельчения частиц минералов под действием импульсного электрического разряда в жидкости. Теоретически и экспериментально показано, что непосредственное действие ударной волны разряда и кавитация у свободной поверхности жидкости не являются основными механизмами дробления частиц кварца с начальным размером менее 0,5 мм. Определен фракционный состав продукта дробления и характер повреждений.

Ключевые слова: *электрогидравлический эффект, импульсный разряд, жидкость, дробление, измельчение.*

Введение. В настоящее время широко применяются мелкодисперсные и ультрадисперсные порошки металлов, неметаллов, различных оксидов и композитных материалов. Порошки металлов используются в качестве горючих в ракетных топливах [1], в металлургии. Оксиды металлов и неметаллов входят в состав теплопроводящих паст, применяются в качестве пигментов, катализаторов, сорбентов. Частицы с неоднородной структурой (композиты), содержащие несколько фаз, могут обладать дополнительными свойствами, например устойчивостью к внешней среде, увеличенной адсорбционной способностью [2] и адгезией к другим средам. Мелкодисперсные порошки различного состава и структуры со стабильными свойствами используют при изготовлении химических источников тока, керамики, магнитных материалов, клеев, лекарственных средств, пластмасс и резины [3].

В зависимости от химического состава и требуемой структуры мелкодисперсные порошки можно получать распылением расплава, испарением вещества с его последующим быстрым охлаждением, химическим синтезом, дроблением твердого материала. Электрический взрыв проводника позволяет получать ультрадисперсные порошки как чистых металлов при использовании разряда в инертном газе, так и различных сочетаний металла и его оксидов в случае химически активной среды [2].

При наличии крупнодисперсного материала, обладающего хрупкими свойствами, часто выгодно не подвергать его полному плавлению либо сублимации, а дробить материал. При этом энергия

затрачивается лишь на образование трещин, а не на полный перевод материала в жидкое либо газообразное состояния. Существуют различные устройства для дробления неметаллических материалов (на основе ударного воздействия, сдавливания, перетираания материала с помощью, как правило, металлического рабочего тела), возможно также применение ультразвука. В случае механических дробилок большие сложности возникают при измельчении материалов, обладающих более высокими прочностными свойствами, прежде всего более высокой по сравнению с материалом рабочего тела твердостью. К таким материалам относятся кварц, корунд и алмазная пыль. При ультразвуковом диспергировании становится возможным фокусировать колебания на материале и повышать развиваемое давление до более высоких значений, чем испытывает излучатель. Однако и в этом случае излучатель быстро изнашивается, а значение получаемого давления ограничено прочностью материала, поэтому не удастся измельчать материалы с более высокими прочностными свойствами.

При использовании импульсного электрического разряда в жидкости, известного как электрогидравлический эффект, рабочим телом является плазма разряда. Плазма не изнашивается подобно твердым материалам, а давление в ней в зависимости от условий может достигать единиц гигапаскалей [4], благодаря чему становится возможным измельчение сколь угодно твердых материалов. Единственными элементами конструкции, которые подвергаются разрушению, являются электроды. Разрушение электродов может привести к загрязнению измельчаемого материала. Однако при правильной настройке устройства площадь истираемых участков электродов невелика по сравнению с площадью поверхности разрядного канала, что обеспечивает получение достаточно чистого продукта.

Известно большое число работ по электрогидроимпульсному получению тонких порошков. Однако эта область еще недостаточно изучена, и для промышленного использования эффекта необходимо решить следующие проблемы:

- определение ведущих механизмов измельчения частиц материалов до размеров менее 1 мм под действием импульсного электрического разряда в жидкости для повышения эффективности дробления и управления фракционным составом продукта [4–6];
- повышение стабильности формирования электрического разряда [7], [8] и увеличение его дробящего действия.

При формировании электрического разряда энергия изначально запасается в конденсаторной батарее. Источник питания для ее зарядки должен обладать устойчивостью как к короткому замыканию

(начальный этап зарядки), так и к холостому ходу (при окончании заряда), а также обладать, по возможности, достаточным КПД преобразования. С помощью специального коммутирующего устройства (газовый разрядник, игнитрон, тригatron) напряжение с конденсатора подается на рабочие электроды.

Для формирования в воде разряда достаточной продолжительности и интенсивности отрицательный электрод выполняют массивным с большой открытой площадью, а положительный электрод, напротив, в виде небольшого острия. Остальную часть положительного электрода дополнительно изолируют герметичным толстым слоем диэлектрика. Это необходимо как для устранения возможности пробоя изоляции, так и для уменьшения емкости электрод–вода, которая мешает правильному формированию разряда.

При подаче импульса высокого напряжения с положительного электрода начинает расти искровой канал – стример, пока не достигнет отрицательного электрода. Эту стадию называют предразрядной [9]. Полезная работа при этом не совершается. Кроме того, чем больший заряд на этом этапе протечет через разрядный промежуток, тем большее количество воды разложится на составляющие, больший объем будет иметь разрядный канал перед поступлением основной энергии и тем меньшее давление в нем может развиваться.

Когда стример замыкает цепь, в участок плазмы между электродами за короткое время поступает вся оставшаяся энергия конденсатора. Период колебаний тока в цепи близок к $\pi\sqrt{LC}$, где C – емкость батареи, L – суммарная индуктивность конденсатора и подводящих проводов. По мере поступления энергии температура плазмы в канале повышается до $(10...40) \cdot 10^3$ К, а давление в ней превышает 1 ГПа [4]. Плазма начинает с огромной силой «расталкивать» окружающую ее жидкость и все объекты, которые находятся в ней. В воде возникает возмущение сжатия, которое при достаточно интенсивном разряде еще у канала разряда принимает профиль ударной волны. Возникшее в воде давление разрушает крупные хрупкие объекты, деформирует металлические листы. Этот эффект широко используется в промышленности.

На следующей стадии полость по инерции продолжает расширяться, плазма в ней остывает и превращается в водяной пар, давление быстро снижается до значения ниже атмосферного. Начинается обратное движение. После схлопывания паровой полости образуется еще один пик давления и излучается волна сжатия. Такое затухающее расширение-схлопывание повторяется еще несколько раз.

Для расчета расширения плазменного канала и импульса развившегося давления в воде используются методы различной сложности в

зависимости от давления в канале и соотношения размер рабочей камеры/длина пробега возмущения в воде за время разряда. В данной работе использованы численные расчеты на основе модели расширения сферы в неограниченной несжимаемой жидкости [10] с поправкой на унос энергии за счет акустических колебаний.

Для случая, когда давление в канале слишком мало и можно не учитывать энергию сжатия воды, запишем уравнение баланса энергии:

$$E = E_{\text{пл}} + E_{\text{кин}} + p_0V = \frac{1}{\gamma-1} pV + 2\pi\rho_0R^3 \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + p_0V, \quad (1)$$

где $E_{\text{пл}}$, $E_{\text{кин}}$ – энергия плазмы и кинетическая энергия; p_0 – атмосферное давление; V – объем плазмы; ρ_0 – начальная плотность воды; γ – показатель адиабаты плазмы; R – радиус плазменной полости; p – давление воды.

Из уравнения непрерывности $h + \frac{1}{2}u^2 + \frac{\partial\Phi}{\partial t} = f(t) = \text{const}$ ($\vec{u} = \text{grad}\Phi$, h – энтальпия) при $\rho = \rho_0 = \text{const}$ после преобразований получаем

$$p(r \geq R) = \frac{\rho_0}{r} (2R\dot{R}^2 + R^2\ddot{R}) - \frac{\rho_0 R^4 \dot{R}^2}{2r^4} + p_0. \quad (2)$$

При $r = R$ выражение для ускорения поверхности сферы имеет вид

$$\ddot{R} = \frac{1}{\rho_0 R} \left[p - p_0 - \frac{3}{2} \rho_0 \dot{R}^2 \right]. \quad (3)$$

Численно проинтегрировав выражение (3), получаем закон расширения сферы. Затем из соотношения (2) определим давление на любом расстоянии от разряда в заданный момент времени.

Для того чтобы частично учесть сжимаемость воды и определить уносимую за счет акустических волн энергию, введем в алгоритм расчета поправку:

$$dE = 4\pi R^2 \frac{(p - p_0)^2}{2\rho_B c_B^2} c_B dt = 2\pi R^2 \frac{(p - p_0)^2}{\rho_B c_B} dt \approx 2\pi R^2 \frac{p^2}{\rho_B c_B} dt, \quad (4)$$

где ρ_B – плотность воды; c_B – скорость звука в воде.

Достоверность получаемых при расчетах результатов проверена при сравнении с экспериментальными данными работы [11], а также экспериментально в тонкостенной камере объемом 50 л при энергии разряда 1 000 Дж и времени протекания электрического разряда 100...150 мкс. По значению первого пика давления расхождение не превышало 20 %.

В качестве механизмов, обеспечивающих разрушение электрическим разрядом находящихся в жидкости частиц, выделяют непосредственное воздействие ударной волны электрического разряда в различных моделях: равномерное сжатие частицы, возникновение сдвиговых напряжений за счет разницы давлений на передней и боковых гранях частицы при обтекании [12] и т. д. Также упоминается действие кавитации [6], раскрытие микротрещин под действием быстропеременного давления, взаимное столкновение и истирание частиц между собой, столкновение частиц со стенками рабочей камеры.

Рассмотрим разрушение хрупкой частицы в жидкости под действием плоской ударной волны как явление откола [13]. Примем, что частица имеет форму цилиндра, расположенного вдоль направления распространения ударной волны.

Для волны, прошедшей через правую границу вода – материал,

$$p_{1пр} = p_0 \frac{\rho_M c_M}{\rho_M c_M + \rho_B c_B}. \quad (5)$$

Для волны, прошедшей в материал и отразившейся от левой границы материал – вода,

$$p_{2отр} = p_0 \frac{2\rho_M c_M (\rho_M c_M - \rho_B c_B)}{(\rho_M c_M + \rho_B c_B)^2}. \quad (6)$$

Рассмотрим сложение волн, от прошедшей в материал и отразившейся от левой границы материал – вода (рис. 1).

Зададим уравнение волны в частице в виде

$$p_1(x, t) = p_{1пр} \exp \left(- \frac{t - \frac{L}{c_M} + \frac{x}{c_M}}{T} \right),$$

тогда суммарное давление в точке откола при сложении прошедшей и повторно отразившейся волн

$$p(x, t) = \exp\left(-\frac{t - \frac{L}{c_M}}{T}\right) \left(p_{2\text{отр}} \exp\left(\frac{x}{c_M T}\right) + p_{1\text{пр}} \exp\left(-\frac{x}{c_M T}\right) \right) = -\sigma_{\text{раз}}. \quad (7)$$

Поскольку в пределе откол возникнет у правой границы частицы, то

$$L = -\frac{c_M}{2} \ln \left[-\frac{\sigma_{\text{раз}} + p_{2\text{отр}}}{p_{1\text{пр}}} \right] T, \quad (8)$$

где T – время, за которое амплитуда пришедшей волны уменьшается в e раз, приблизительно равное времени электрического разряда. В работе [17] указано, что для разрядов с энергией, равной десяткам джоулей, минимально реализуемое время составляет 200 нс.

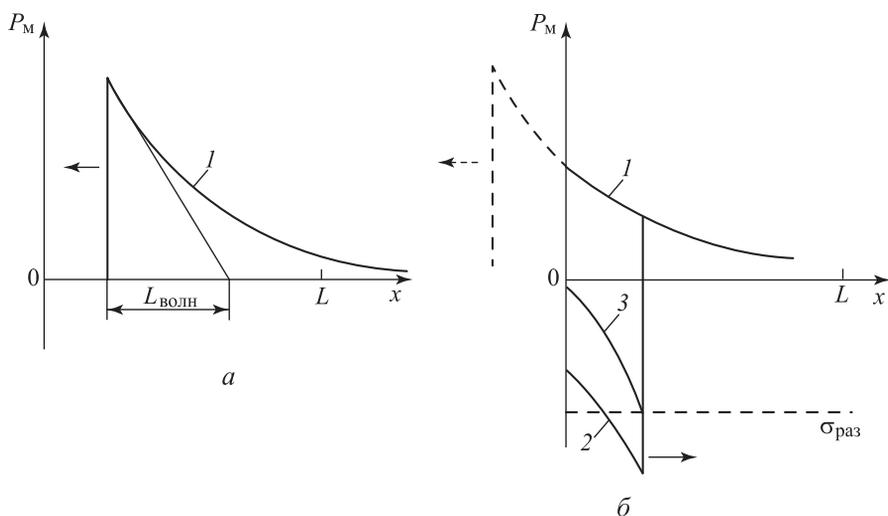


Рис. 1. Возникновения откола (стрелками обозначено направление ударных волн):

a – волна прошла в частицу со стороны ее правой границы; b – волна отражается от левой границы частицы; в точке $-\sigma_{\text{раз}}$ материал разрушается; 1 – исходная волна в материале; 2 – волна, отразившаяся от границы материал–вода; 3 – результат сложения исходной и отразившейся волн; L – характерный размер частицы; $L_{\text{волн}}$ – длина ударной волны

С использованием формулы (8) для материалов, свойства которых приведены в табл. 1, определен характерный размер частиц, которые могут подвергнуться дальнейшему дроблению. Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 1

Усредненные физические свойства материалов

Материал	Плотность, кг/м ³	Скорость звука, м/с	Предел прочности на растяжение, МПа
Стекло (оконное)	2 550	5 500	35...100 (среднее значение 65) [15]
Кварц	2 650	5 700	210 [16]
Гранит	2 600	3 950	14...25 (среднее значение 19,5) [14][16]
Корунд	4 000	5 000	2 600 [16]

Таблица 2

Расчетное минимальное давление, обеспечивающее дробление материалов, и ожидаемая дисперсность продукта при различных давлениях на фронте ударной волны

Материал	p_{0min} , МПа	Размер частицы, подвергающейся разрушению, мкм, при времени разряда 200 нс и давлении на фронте пришедшей волны p_0 , МПа						
		$p_0 \rightarrow \infty$	10^4	10^3	500	200	100	50
Стекло (оконное)	45	118	120	143	170	260	440	1 340
Кварц	140	114	122	200	300	810	–	–
Гранит	15	116	117	122	128	147	180	260
Корунд	1 620	76	164	–	–	–	–	–

При сравнительно небольших давлениях достижимая дисперсность зависит в основном от предела прочности материала на растяжение. Однако даже при неограниченном росте давления размер частиц не может быть меньше некоторого предельного значения порядка нескольких десятков микрометров.

Эффективность откольного разрушения может несколько увеличиться при наличии пузырьков воздуха на частице. Оценим, как изменится давление в повторно отраженной волне по сравнению с границей материал–вода на примере оконного стекла:

$$\frac{p_{2отр.воздух}}{p_{2отр}} \approx \frac{\rho_B c_B + \rho_M c_M}{\rho_B c_B - \rho_M c_M} = \frac{1000 \cdot 1500 + 2550 \cdot 6790}{2550 \cdot 6790 - 1000 \cdot 1500} \approx 1,19.$$

Дополнительным источником ударно-волнового воздействия на материал являются колебания парогазовой полости, оставшейся после разряда. В зависимости от интенсивности разряда давление во второй волне может быть как меньше, так и значительно превышать давление в первой волне. Это подтверждается экспериментами [18] и численным расчетом.

Результаты экспериментов. Для проверки закономерностей дробления материала электрическими разрядами различной интенсивности была проведена серия экспериментов с использованием кварцитной крошки и речного кварцевого песка. Разрядный узел представлял собой два одножильных провода в изоляции сечением 10 мм^2 . Конец положительного электрода заострен, а на отрицательный электрод надета обжимная клемма с болтом М6 и колпачковой гайкой. При использовании конденсатора К75-40а (80 мкФ 3 кВ) длина пробиваемого в воде участка (пробоя) составляла 3 мм. При использовании конденсатора КБГ- П (0,5 мкФ, 10 кВ) сначала не удавалось получить пробой воды более 3 мм. Лишь после дополнительной изоляции погруженных в воду проводов слоем силиконового герметика толщиной 5 мм получили пробой длиной до 5 мм. Причем стримеры срывались с положительного электрода чаще под углом к его оси и не с острия электрода, а из места контакта проводника и края изоляции. Когда отрицательный электрод зафиксировали под углом 45° к оси острия, длина пробоя достигла 12 мм. Так как при погружении в песок пробой воды затруднялся, пришлось уменьшить расстояние до 5 мм.

При проведении первого эксперимента в тонкостенную емкость объемом 3 л помещали навеску 500 г кварцита с размером гранул 3...6 мм и заливали ее водой. Электроды размещали на поверхности слоя крошки. Проводили 20 разрядов конденсатора (80 мкФ, 3 кВ). Типичные осциллограммы тока и напряжения разряда приведены на рис. 2.

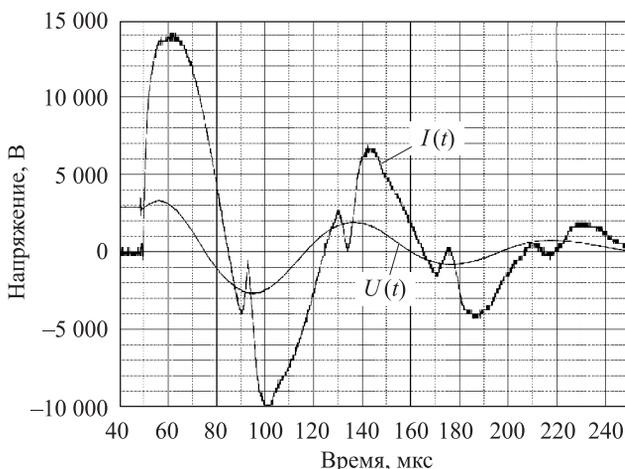


Рис. 2. Осциллограммы тока и напряжения при разряде конденсатора 80 мкФ, 3 кВ в воде. Расстояние между электродами 3 мм

Вода в камере помутнела от образовавшейся взвеси мелкодисперсных частиц. После сушки и просеивания обнаружили большое количество частиц размером 1...2 мм.

Во втором эксперименте использовали навеску 200 г кварцевого песка с размером частиц 0,325...0,5 мм. Помутнение отмечено не было. После сушки и просеивания обнаружилось лишь незначительное количество мелких частиц, связанное с некачественной подготовкой образца.

Перед экспериментами с использованием конденсатором 0,5 мкФ, 10 кВ кварцевый песок просеивали на сите с размером ячейки 0,325 мм в течение 10 мин, после чего сито очищали от застрявших частиц и возвращали их в крупную фракцию. Просеянный песок взвешивали, данные записывали в табл. 3, затем просеивание повторяли.

Таблица 3

Фракционный состав, %, кварцевого песка при размере частиц, мм

Стадии	0,325...0,5	0,25...0,325	0,2...0,25	0,1...0,2	До 0,1 мм
Подготовка 1			3,37		
Подготовка 2			2,55		
Подготовка 3 (экспоненциальная аппроксимация)			1,93		
После дробления 1	96,1	2,8	0,6	0,5	
После дробления 2	89	3,9	3,5	2,3	1,3

При проведении экспериментов наблюдали следующее.

1. Стример не достигал отрицательного электрода.

2. Пробой воды сопровождался сравнительно слабым ударом. На осциллограмме наблюдалась длительная, вплоть до единиц миллисекунд, предразрядная стадия, в течение которой напряжение конденсатора снижалось до 5...7 кВ. Импульс состоял из двух-трех полупериодов колебаний (рис. 3, а).

3. Сильный удар. Предразрядная стадия короткая либо отсутствует, импульс тока одиночный (рис. 3, б). В экспериментах учитывали только такие разряды.

В случае тонкостенной камеры объемом 3 л разрядник помещали на поверхности слоя песка. Фракция 0,325...0,5 мм обработанного песка была использована в следующем эксперименте.

В случае толстостенной стальной цилиндрической камеры диаметром 65 мм и высотой 220 мм со сферическим дном разряды проводились между заостренным положительным электродом и дном камеры в толще песка. Результаты экспериментов приведены в табл. 3.

После дробления и разделения на фракции песок исследовали под микроскопом. По сравнению с фракцией до 0,1 мм, выделенной из образца, не подвергавшегося действию электрических разрядов, в об-

работанном песке обнаружено значительно большее количество сравнительно мелких частиц (рис. 4).

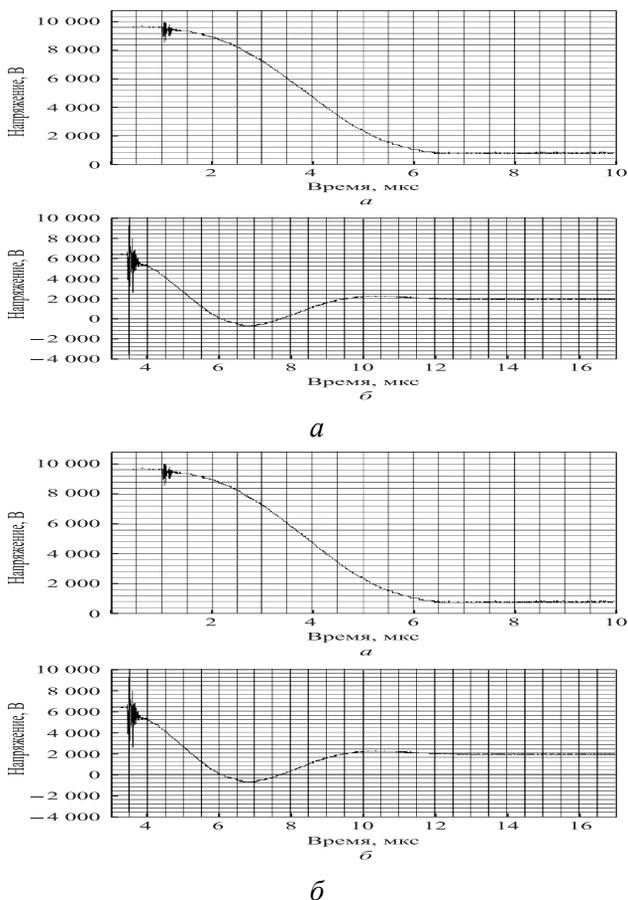


Рис. 3. Осциллограммы при разряде конденсатора 0,5 мкФ, 10 кВ:

а – слабый удар, видны колебания напряжения; б – «сильный» удар, единственный импульс

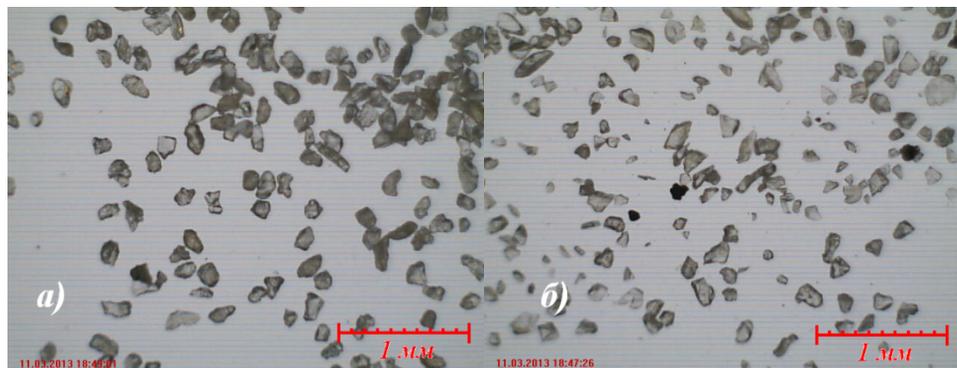


Рис. 4. Фракции кварца с размером частиц до 0,1 мм:

а – выделенная из исходного образца; б – из образца, подвергнувшегося обработке

У некоторых частиц фракции 0,325...0,500 мм обнаружены трещины, расположенные преимущественно с одной стороны (рис. 5).

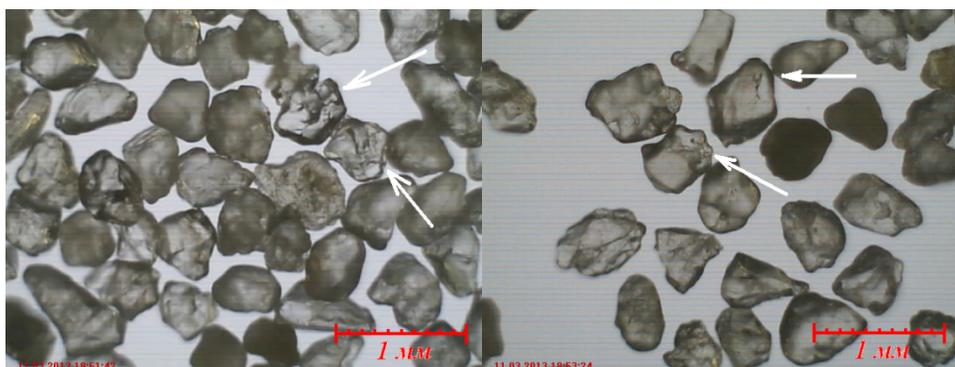


Рис. 5. Кварцевый песок после дробления. Фракция 0,325...0,5 мм (стрелками отмечены трещины)

Анализ результатов. Давление, вызванное разрядом конденсатора 80 мкФ, 3 кВ, оказалось достаточным для измельчения кварцитной крошки с размером частиц 3...6 мм. Однако разряд не оказал влияния на кварцевый песок фракции 0,325...0,5 мм. Параметры разряда конденсатора 0,5 мкФ, 10 кВ позволяют измельчать частицы фракции 0,325...0,5 мм. При расчете давления в канале разряда при времени разряда 5 мкс и размере наиболее крупных частиц 0,5 мм получили физически недостижимое значение: либо время спада ударной волны гораздо меньше времени разряда, либо механизм откольного разрушения не участвует в дроблении мелких частиц.

Фракционный состав образцов показывает, что измельчение происходит лишь в малой по сравнению с объемом камеры области, а продукт дробления образуется в широком спектре размеров.

Более эффективно дробление происходило в камере небольшого размера с жесткими стенками, несмотря на большое расстояние до свободной поверхности воды. Таким образом, кавитация вблизи свободной поверхности не является основным механизмом дробления.

Закключение. Дробление импульсным электрическим разрядом в жидкости – перспективный способ получения мелкодисперсных порошков.

Исходя из сделанных предположений о связи формы ударной волны и длительности разряда, дробление кварца с размером частиц менее 0,5 мм происходит преимущественно не по механизму откола или за счет кавитационных процессов на свободной границе жидкости, а посредством взаимного столкновения и истирания частиц.

Дробление прочных монокристаллических материалов происходит в непосредственной близости к разрядному каналу. При этом размеры полученного порошка находятся в широких пределах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сакович Г.В., Архипов В.А., Ворожцов А.Б., Коротких А.Г. Твердые ракетные топлива на основе двойного окислителя, содержащие ультрадисперсный порошок алюминия. *Известия Томского политехнического университета*, 2009, т. 314, № 3, с. 18–22.
- [2] Назаренко О.Б. *Особенности формирования продуктов электрического взрыва проводников в конденсированных средах*. Дис... канд. техн. наук. Томск, 1996, 179 с.
- [3] Виноградов Б.В., Федин Д.А., Емельяненко В.И., Осташко И.А. Об измельчении твердых остатков пиролиза изношенных автомобильных шин электрогидроимпульсным способом. *Вопросы химии и химической технологии*, 2008, № 6, с. 163–166.
- [4] Григорьев А.Л. *Формирование ударных волн импульсными электрическими разрядами в воде и исследование их воздействия на преграды*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Москва, 2007, 30 с.
- [5] Виноградов Б.В., Федин Д.А. Экспериментальное и теоретическое исследование тонкого электрогидроимпульсного измельчения материалов. *Новые огнеупоры*, 2005, № 3, с. 41 – 43.
- [6] Виноградов Б.В., Федин Д.А., Емельяненко В.И. Эффективность измельчения порошков в составной электроразрядной камере с упругими элементами. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*, 2005, № 51, с. 99 – 105.
- [7] Юшков Ю.Г. Исследование инициирования электрического разряда в воде при разработке электрогидравлической технологии. Технические науки: теория и практика. *Матер. междунар. заоч. науч. конф.* Чита, апрель 2012 г. Изд-во «Молодой ученый», 2012, с. 139–141.
- [8] Курец В.И., Соловьев М.А., Жучков А.И., Баварская А.В. *Электроразрядные технологии обработки и разрушения материалов: учеб. пособие*. Томск, Изд-во Томского политехнического университета, 2012, 272 с.
- [9] Юткин Л.А. *Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности*. Ленинград, Машиностроение, 1986, 253 с.
- [10] Бескаравайный Н.М., Поздеев В.А. *Теоретические основы измерения импульсных давлений в жидкой среде*. Киев, Наукова думка, 1981, 92 с.
- [11] Наугольных К.А., Рой Н.А. *Электрические разряды в воде*. Москва, Наука, 1971, с. 155.
- [12] Вилков К.В., Григорьев А.Л., Нагель Ю.А., Уварова И.В. Обеззараживающее действие мощного импульсного электрического разряда в воде. Т. II. *Письма в ЖТФ*, 2004, Т. 30, вып. 7, с. 48–53.
- [13] Андреев С.Г. *Физика взрыва*. Т. 2. 3-е изд. Орленко Л.П., ред. Москва, Наука, 2004, 651 с.
- [14] Батюк Е.И. *Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах*. Москва, Недра, 1988, 255 с.
- [15] Бартнев Г.М. *Строение и механические свойства неорганических стекол*. Москва, Изд-во литературы по строительству, 1966, 216 с.
- [16] *Справочник физических свойств горных пород*. Мельников Н.В., ред. Москва, Недра, 1975, 279 с.
- [17] Павленко А.В. Волна давления при наносекундном электрическом взрыве вольфрамового проводника в воде. *Письма в ЖТФ*, 2008, т. 34, вып. 3, с. 89.
- [18] Гулый Г.А., Малюшевский П.П. *Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах*. Киев, Наукова думка, 1977, 175 с.

Статья поступила в редакцию 05.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Инфимовский Ю.Ю., Строков М.А. Перспективы получения мелкодисперсных порошков с помощью импульсного электрического разряда в жидкости. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 8. URL: <http://engjournal.ru/catalog/fundamentals/physics/1104.html>

Инфимовский Юрий Юрьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор четырех работ в области высокотемпературной сверхпроводимости, электрических разрядов в жидкости. e-mail: inf-yura@yandex.ru

Строков Максим Анатольевич родился в 1990 г., студент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор двух работ в области электрических разрядов в жидкостях. e-mail: makstrokov@mail.ru