

УДК 621.7.044.4

**О механизмах измельчения минеральных материалов импульсным электрическим
разрядом в жидкости**

М.А. Строков

*Студент, кафедра «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Россия*

*Научный руководитель: Инфимовский Ю.Ю., к.т.н., доцент кафедры «Физика»
МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
makstrokov@mail.ru

Введение

При подаче на погружённые в жидкость электроды специально сформированного импульса высокого напряжения в образовавшийся плазменный канал в течение короткого времени передаётся энергия конденсаторной батареи. В результате плазма разогревается до температур 10-40 тыс. К [1][10], давление в ней резко повышается вплоть до единиц ГПа [10], паро-плазменная полость начинает расширяться и через окружающую жидкость совершает полезную механическую работу в виде деформации, дробления и перемещения.

Интерес к данному эффекту вызван экологической чистотой технологии, доступностью электроэнергии, возможностью формировать импульсы в широком диапазоне энергий, времён и многократно повторять разряды без разборки оснастки.

Одной из областей применения импульсного электрического разряда в жидкости является получение мелкодисперсных порошков для нужд металлургии, химии, медицины. Тонкие порошки применяются в качестве наполнителей пластмасс, пигментов, катализаторов, сорбентов, компонентов для изготовления химических источников тока, керамики, магнитных материалов, клеев.

Для быстрой адаптации разрядно-импульсной технологии под конкретную задачу необходимо знать наиболее существенные факторы воздействия на материал и уметь ими

управлять соответствующим изменением электрической цепи и рабочей оснастки. Используемые для получения тонких порошков разряды характеризуются временем протекания 10 и менее микросекунд и энергией 1-1000 Дж. При этом уже в непосредственной близости [10][11] от разрядного канала возмущения жидкости принимают характер ударной волны, что значительно упрощает дальнейшие расчёты. Из механизмов, ответственных за измельчение частиц материала выделяют непосредственное воздействие на них первичной ударной волны разряда, действие вторичных ударных волн, которые образуются при дальнейших пульсациях паровой полости, взаимное истирание частиц при увлечении их скоростными потоками жидкости, кавитационные эффекты на свободной границе жидкости [1]. В работах [10][11] сделаны попытки оценить влияние тех или иных механизмов, однако общая картина процесса остаётся недостаточно изученной для массового внедрения технологии.

В данной работе сделана попытка теоретически и экспериментально определить наиболее важные механизмы дробления, оценить эффективность процесса и ожидаемую дисперсность продукта в зависимости от характеристик разряда, механических свойств измельчаемого материала и его расположения в рабочей камере.

Теоретическая часть

Рассмотрим разрушение хрупкой частицы в жидкости под действием ударной волны как явление откола [4]. Для упрощения примем, что фронт волны плоский, а частица имеет форму цилиндра, расположенного вдоль направления распространения волны (см. рис.1).

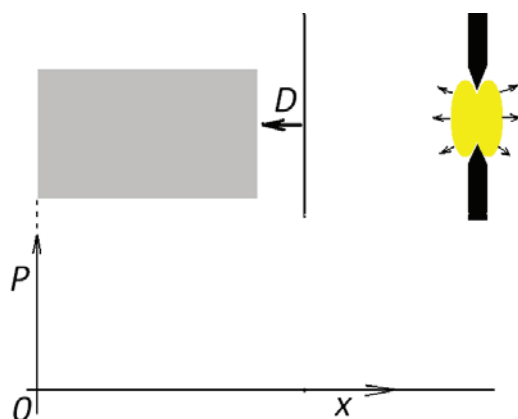


Рис. 1. Модель воздействия ударной волны разряда на частицу в жидкости: ось Ox – координата с началом на границе частицы. P – в зависимости от среды давление в жидкости либо механическое напряжение в твёрдом материале.

Характеристика рассматриваемого материала: плотность ρ , скорость звука c , предел прочности на растяжение $\sigma_{\text{разр}}$.

Изначально волна распространялась в воде: плотность 1000 кг/м^3 , скорость звука 1500 м/с , избыточное давление на фронте пришедшей волны P_0 .

Напряжение в волне, прошедшей через правую границу вода-материал [3]

$$P_{1\text{прош}} = P_0 \frac{2\rho c}{\rho c + \rho_{\text{в}} c_{\text{в}}} \quad (1)$$

в отразившейся от границы обратно в воду

$$P_{1\text{отр}} = P_0 \frac{\rho c - \rho_{\text{в}} c_{\text{в}}}{\rho c + \rho_{\text{в}} c_{\text{в}}} \quad (2)$$

В волне, прошедшей в материал и отразившейся от левой границы материал-вода

$$P_{2\text{отр}} = P_{1\text{прош}} \frac{\rho_{\text{в}} c_{\text{в}} - \rho c}{\rho c + \rho_{\text{в}} c_{\text{в}}} = P_0 \frac{2\rho c (\rho_{\text{в}} c_{\text{в}} - \rho c)}{(\rho c + \rho_{\text{в}} c_{\text{в}})^2} \quad (3)$$

$P_{2\text{отр}}$ - максимально возможное напряжение растяжения в частице. Если оно будет меньше предела прочности на разрыв, то разрушение сплошного материала по рассматриваемому механизму невозможно.

Чтобы определить связь между характерной длиной волны и размером частиц, не подвергающихся разрушению, рассмотрим сложение волн: прошедшей в материал частицы и отразившейся от левой границы (см. рис.2)

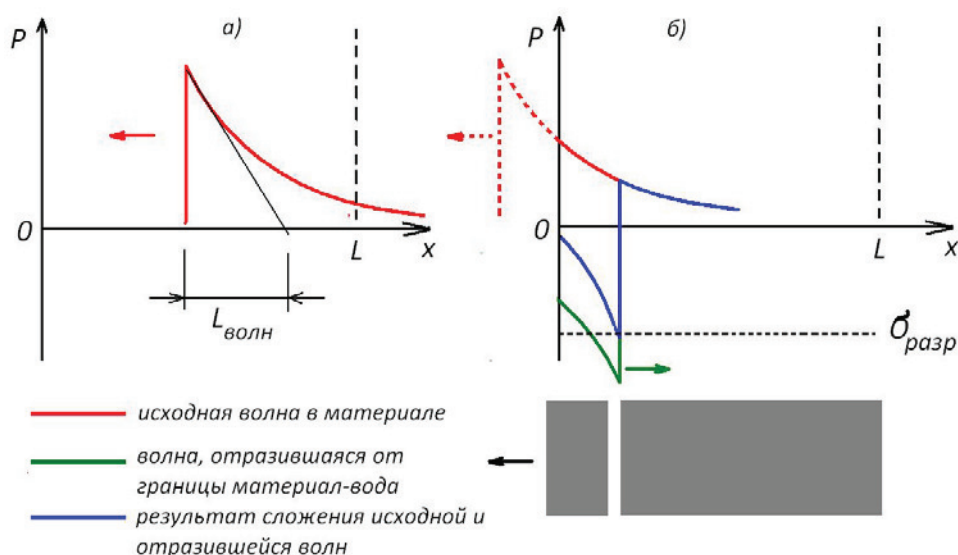


Рис. 2. Возникновения откола: а) волна прошла в частицу со стороны правой границы б) волна отражается от левой границы; в точке, где $\sigma = -\sigma_{\text{разр}}$ материал раскалывается

Зададим волну в частице в виде $P_1(x, t) = P_{1\text{прош}} \exp\left(-\frac{t-\frac{L}{c}+\frac{x}{c}}{T}\right)$, тогда отражённая от второй границы примет вид $P_2(x, t) = P_{2\text{отр}} \exp\left(-\frac{t-\frac{L}{c}-\frac{x}{c}}{T}\right)$, а суммарное давление в точке откола $P(x, t) = P_{2\text{отр}} \exp\left(-\frac{t-\frac{L}{c}-\frac{x}{c}}{T}\right) + P_{1\text{прош}} \exp\left(-\frac{t-\frac{L}{c}+\frac{x}{c}}{T}\right)$, или

$$P(x, t) = \exp\left(-\frac{t-\frac{L}{c}}{T}\right) \left(P_{2\text{отр}} \exp\left(\frac{x}{cT}\right) + P_{1\text{прош}} \exp\left(-\frac{x}{cT}\right) \right) = -\sigma_{\text{разр}} \quad (4)$$

Очевидно, что в пределе откол возникнет у правой границы частицы, то есть соответствует $x = L$ и времени $t = \frac{2L}{c}$. Тогда

$$\exp\left(-\frac{L}{cT}\right) \left(P_{2\text{отр}} \exp\left(\frac{x}{cT}\right) + P_{1\text{прош}} \exp\left(-\frac{x}{cT}\right) \right) = -\sigma_{\text{разр}}$$

$$P_{2\text{отр}} + P_{1\text{прош}} \exp\left(-\frac{2L}{cT}\right) = -\sigma_{\text{разр}}$$

$$T = \frac{2L}{-c \ln\left[-\frac{\sigma_{\text{разр}} + P_{2\text{отр}}}{P_{1\text{прош}}}\right]} \quad (5)$$

$$L = -\frac{c}{2} \ln\left[-\frac{\sigma_{\text{разр}} + P_{2\text{отр}}}{P_{1\text{прош}}}\right] T \quad (6)$$

Здесь T – время, за которое амплитуда пришедшей волны уменьшается в e раз. Его можно приближенно считать равным времени разряда. Таким образом, мы получили зависимость максимального времени разряда от необходимого размера частиц. Для материалов, свойства которых указаны в таблице 1, проведены соответствующие расчёты. Результаты показаны в таблице 2.

Таблица 1

Усреднённые физические свойства материалов

материал	Плотность, кг/м ³	Скорость звука, м/с	Предел прочности на растяжение
Стекло оконное	2550	5500	35-100 (среднее 65)[7]
кварц	2650	5700	210 [8]
гранит	2600	3950	14-25(среднее 19.5) [6][8]

корунд	4000	5000	2600 [8]
--------	------	------	----------

Таблица 2

Расчётное минимальное давление $P_{0\text{мин}}$, приводящее к дроблению материалов, и ожидаемая дисперсность продукта при различных давлениях на фронте ударной волны

материал	$P_{0\text{мин}}$, МПа	Размер частицы, подвергающейся разрушению L , мкм при времени разряда 200 нс и давлении на фронте пришедшей волны P_0 , равном						
		$P_0 \rightarrow \infty$	10ГПа	1ГПа	500МПа	200МПа	100МПа	50 МПа
Стекло оконное	45	118	120	143	170	260	440	1340
Кварц	140	114	122	200	300	810	-	-
Гранит	15	116	117	122	128	147	180	260
Корунд	1620	76	164	-	-	-	-	-

В [5] указано, что для разрядов с энергией десятки Джоулей минимально реализуемое время составляет 200 наносекунд. С использованием формулы (6) был определён характерный размер частиц, которые могут подвергнуться дальнейшему дроблению.

Как видно из таблицы 2, 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 значения, определяемого формулой (7)

$$L = -\frac{c}{2} \ln \left[-\frac{P_{2\text{отр}}}{P_{1\text{прош}}} \right] T \quad (7)$$

То есть минимальный размер частиц определяется не прочностью материала, а его акустической плотностью и ни для одного из рассматриваемых материалов не может быть менее нескольких десятков микрометров.

В рамках модели несжимаемой жидкости разряд с энергией 100 Дж и характерным временем 200 нс на расстоянии 50 мм (это характерный размер лабораторных установок) обеспечивает давление 200 МПа. Что достаточно для разрушения многих материалов, однако не позволяет получить хорошую дисперсность. Давления порядка единиц и

десятков ГПа возможны лишь в непосредственном контакте с каналом разряда. Однако максимальное давление в канале может быть оценено только экспериментально, так как зависит в большей степени от начального объёма канала и, соответственно, от режима его формирования. Используемая в работе математическая модель - расширение сферического пузырька с плазмой в несжимаемой жидкости, не описывает начальную стадию реального разряда.

Эффективность откольного разрушения может несколько увеличиться при наличии пузырьков газа налипших на частицу. Рассмотрим случай, когда пузырёк оказался со стороны, противоположной источнику возмущения.

Скорость звука в газах и их плотность гораздо меньше, чем в жидкостях. Соответственно меньше их акустическая плотность. Для воздуха это значение $\rho c = 1.29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 340 \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 438 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$, что гораздо меньше значений для твёрдых тел. У стекла, например, $\rho c = 2550 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 6790 \frac{\text{м}}{\text{с}} \approx 1.7 \cdot 10^7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$. То есть на границе материал-воздух отражение волн происходит как от свободной поверхности. Оценим, как изменится давление в отражённой волне в сравнении с границей материал-вода на примере стекла.

$$\frac{P_{2\text{отп}/\text{возд}}}{P_{2\text{отп}}} \approx \frac{P_{1\text{прон}} \frac{-\rho c}{\rho c}}{P_{1\text{прон}} \frac{\rho_6 c_6 - \rho c}{\rho_6 c_6 + \rho c}} = -\frac{\rho_6 c_6 + \rho}{\rho_6 c_6 - \rho c} = \frac{1000 \cdot 1500 + 2550 \cdot 6790}{2550 \cdot 6790 - 1000 \cdot 1500} \approx 1.19$$

Таким образом, наличие пузырьков приводит к возникновению в материале несколько больших разрывных напряжений.

Особый интерес представляет случай, когда пузырёк расположен со стороны источника возмущения. В таком случае возможна так называемая пузырьковая кумуляция. Однако это явление трудно поддаётся количественному расчёту.

Дополнительным источником ударноволнового воздействия на материал являются колебания парогазовой полости, оставшейся после разряда. После расширения парогазовой полости разряда пониженное давление в ней приводит к обратному движению. Через некоторое время полость с большой скоростью схлопывается, излучая ещё одну волну сжатия. В зависимости от интенсивности разряда, давление во второй волне может быть как меньше, так и значительно превышать давление в первой волне. Это подтверждается экспериментами [2] и численным расчётом.

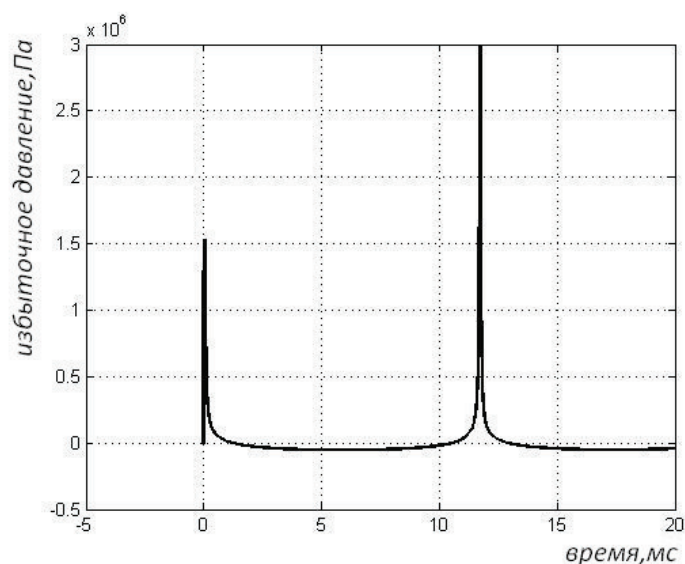


Рис. 3. Расчётное избыточное давление на расстоянии $r=0.1$ м от разряда $E=100$ Дж
 $T=50$ мкс

Ещё одним механизмом диспергирования считаются кавитационные явления при разряде. Кавитацией называют образование в жидкости полостей, заполненных паром, в результате местного понижения давления в жидкости, которое может происходить либо при увеличении её скорости либо при прохождении акустической волны большой интенсивности во время полупериода разрежения. В фазе сжатия полости схлопываются, излучая возмущения значительной интенсивности.

Электрический разряд в жидкости формирует импульс только положительного давления. Однако когда волна выходит на свободную поверхность жидкости либо достаточно тонкую стенку камеры, происходит её инверсия. В результате обратно распространяется волна разрежения и возможна кавитация. Так же кавитация может возникать при обтекании водой взвешенной частицы, так как из-за разной плотности скорости потока и частицы различаются.

Особое внимание уделяют такому механизму измельчения, как взаимное столкновение и трение частиц. Из-за различной формы, размеров и сложной картины течений при разряде он не поддаётся расчёту и его влияние может быть оценено только экспериментально.

Экспериментальная часть

Для проверки закономерностей дробления разрядами различной интенсивности была проведена серия экспериментов с использованием кварцитной крошки и речного кварцевого песка.

Напряжения заряда конденсатора в опытах измерялось через омический делитель. Изменение напряжения на конденсаторе при разряде проводилось при помощи смешанного делителя напряжения, схема которого представлена на рис.4 и цифрового осциллографа. Точность настройки делителя составляла 0.25%.

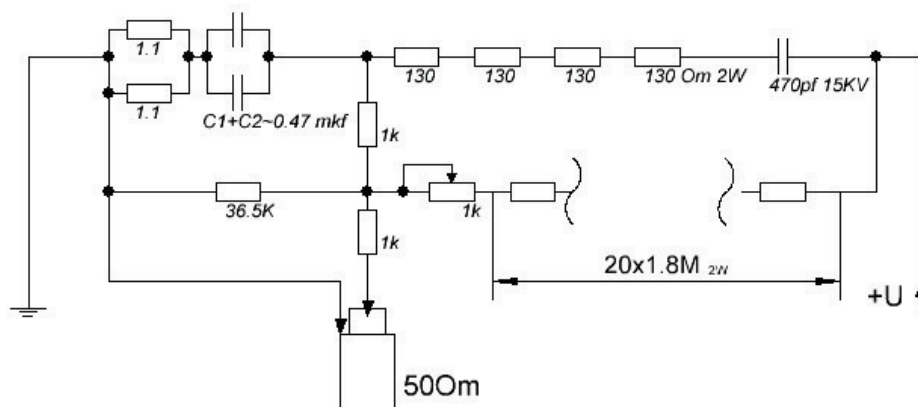


Рис. 4. Схема смешанного делителя напряжения

Для измерения тока был использован шунт 75ШИП1-100-0.5 со схемой компенсации индуктивности, присоединённый непосредственно к одной из клемм конденсатора. Сигнал с шунта так же использовался для запуска осциллографа.

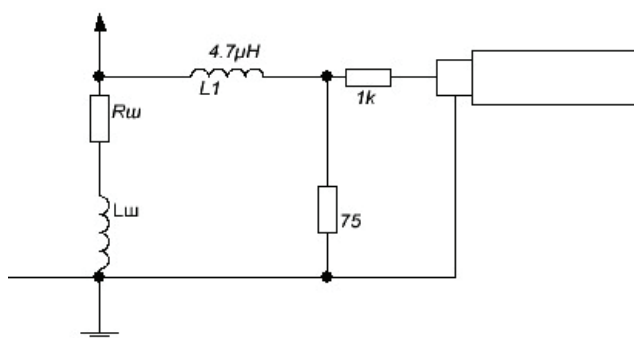


Рис. 5. Схема измерения шунтом с цепью компенсации

Сигнал делителя напряжения достаточно точно передавал напряжение на конденсаторе во всех опытах. Сигнал с шунта значительно искажался при импульсах длительностью менее 10 мкс. Поэтому осциллограммы тока таких разрядов не приведены.

Конденсатор заряжался от электронного преобразователя, выполненного по схеме «полумост» с балластной индуктивностью, обладающей высоким КПД и устойчивостью к

короткому замыканию. Разрядная цепь коммутировалась разрядником, на основе двух закруглённых стержней диаметром 10 мм.

Разрядный узел представлял собой два провода в изоляции сечением 10 мм²: конец положительного электрода был заострён, а на отрицательный электрод надета обжимная клемма с болтом М6 и колпачковой гайкой. При использовании конденсатора 80 мкФ 3 КВ длина пробиваемого в воде участка составляла 3 мм. В опытах с конденсатором 0.5 мкФ 10 КВ первоначально не удавалось получить пробой воды более 3 мм. Лишь после дополнительной изоляции погружённых в воду проводов слоем силиконового герметика толщиной 5 мм удалось получить разряды до 5 мм. Причём было замечено, что стримеры срываются с положительного электрода преимущественно в радиальном направлении, а не вдоль его оси. Когда отрицательный электрод зафиксировали под углом 45° к оси острия, длина пробоя достигла 12 мм. Так как при погружении в песок пробой воды затруднялся, в экспериментах пришлось уменьшить расстояние до 5 мм.

В первом опыте была взята кварцитовая крошка с размером гранул 3-6 мм. В металлическую ёмкость объёмом 3 л помещалась навеска 500 г и не до краёв заливалась водой. Ёмкость прикрывалась тяжёлой крышкой с грузом. Электроды размещались на поверхности слоя крошки. Провели 20 разрядов конденсатора 80 мкФ 3 КВ. Типичные осциллограммы тока и напряжения разряда приведены на рис. 6.

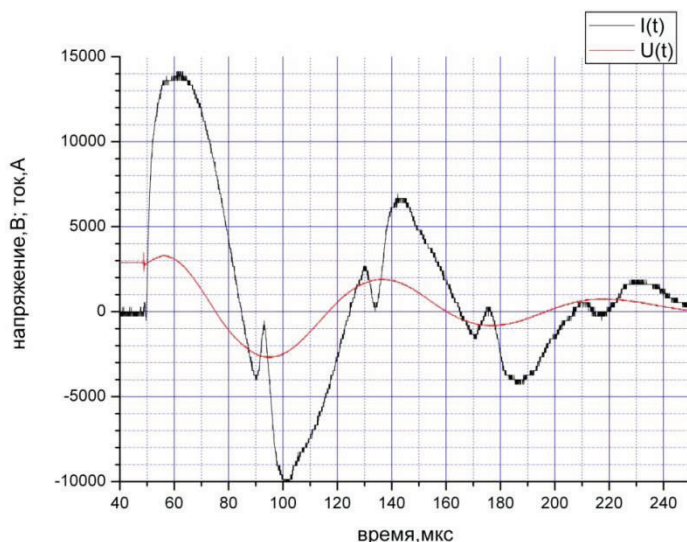


Рис.6. Типичная осциллограмма тока и напряжения при разряде конденсатора 80 мкФ 3 КВ в воде. Расстояние между электродами 3 мм

После опыта вода в камере помутнела от взвеси мелкодисперсных частиц. Кварцит высушили и просеяли. Обнаружили большое количество частиц размером 1-2 мм.

Затем был подготовлено 200 г кварцевого песка с размером частиц 0.325-0.5 мм.

Аналогично провели 20 разрядов 80 мкФ 3 КВ. Вода при этом не помутнела, после сушки песка и просеивания обнаружилось лишь незначительное количество мелких частиц, связанное с некачественной подготовкой образца.

Для опытов с конденсатором 0.5 мкФ 10 КВ кварцевый песок подготовили более тщательно. Просеивание вели на сите 0.325 мм в течение 10 минут, после чего сито очищали от застрявших частиц и возвращали их в крупную фракцию. Прошедший песок взвешивали. Данные записывали в таблицу 3, просеивание повторяли.

Таблица 3

Вес песка прошедшего через сито 0.325мм при подготовке и после первого дробления.
Время просева 10 минут

№ просеивания	Вес, грамм	Вес до просеивания, грамм	% прошедшего песка от количество перед просеиванием
1	3.97	117.54	3.37 %
2	2.90	113.57	2.55 %
3 (линейная аппроксимация)			1.73 %
3(экспоненциальная аппроксимация)			1.93 %
После дробления	3.85	99.45	3.87 %

В опытах наблюдалось три типа разрядов.

1. Стример не достигал отрицательного электрода, на осциллограмме видны только помехи.
2. Пробой воды сопровождался сравнительно слабым ударом. На осциллограмме наблюдается длительная, вплоть до единиц миллисекунд, предразрядная стадия, в течение которой напряжение конденсатора спадает до 5-7 КВ. Импульс со то и из 2-3 полупериодов колебаний (рис.7 б).
3. Сильный удар. Предразрядная стадия короткая либо отсутствует, импульс тока одиночный (рис.7 а).

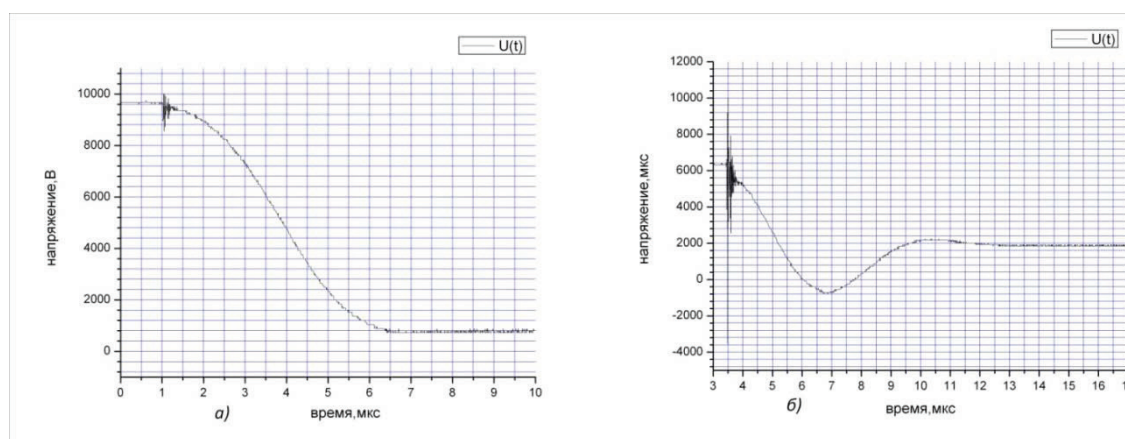


Рис. 7. Осциллограммы напряжения при разряде конденсатора 0.5 мкФ 10 КВ: а) «сильный» удар, единичный импульс б) более слабый, видны колебания напряжения

В опытах считались только разряды, соответствующие осциллограмме на рис.7а. Разряды проводились с промежутком 3 секунды.

В первом случае разрядник размещался на поверхности слоя песка в той же камере, что и в предыдущем опыте. Данные по фракционному составу песка после дробления занесены в таблицы 3 и 4. Фракция 0.325-0.5 мм была использована в следующем опыте.

Таблица 4

Фракционный состав песка после дробления 1

фракция	Вес, грамм	% от веса образца	Сумма, грамм
0.325...0.5 мм	95.6	96.1%	99.45
Менее 0.325 мм	3.85	3.9%	
0.25..0.325 мм	2.77	2.8%	3.84
0.2...0.25 мм	0.62	0.6%	
Менее 0.2 мм	0.45	0.5%	

Во втором случае использовалась открытая стальная цилиндрическая камера со сферическим дном. Диаметр камеры 65 мм. Толщина стенок 1 мм. Высота столба воды 220 мм. Разряды проводились между заострённым положительным электродом и дном камеры в толще песка. Данные по фракционному составу песка занесены в таблицу 5.

Фракционный состав песка после дробления 2

фракция	Вес, грамм	% от веса образца	Сумма после разделения, грамм
0.325...0.5 мм	76.74	89 %	9.44
Менее 0.325 мм	9.52	11 %	
0.25..0.325 мм	3.35	3.9 %	
0.2...0.25 мм	3.03	3.5 %	
0.1.. 0.2 мм	1.98	2.3%	
Менее 0.1 мм	1.08	1.3 %	

После дробления и разделения на фракции песок был рассмотрен под микроскопом. В сравнении с фракцией 0-0.1 мм, выделенной из образца, не подвергавшегося действию разрядов, во фракции 0-0.1 мм обработанного песка обнаружено значительно большее количество сравнительно мелких частиц (см. рис.8)

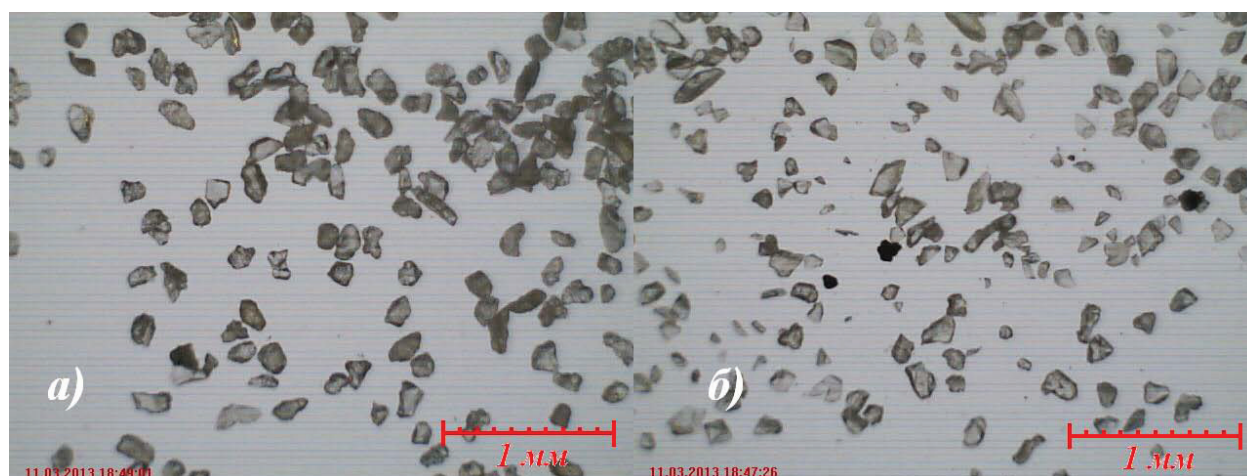


Рис. 8. Сравнение фракций кварца 0-0.1 мм под микроскопом. а) выделенной из исходного образца б) выделенной из образца, подвергшегося обработке

У некоторых частиц фракции 0.325-0.5 мм обнаружены трещины, расположенные преимущественно с одной стороны (см. рис.9).

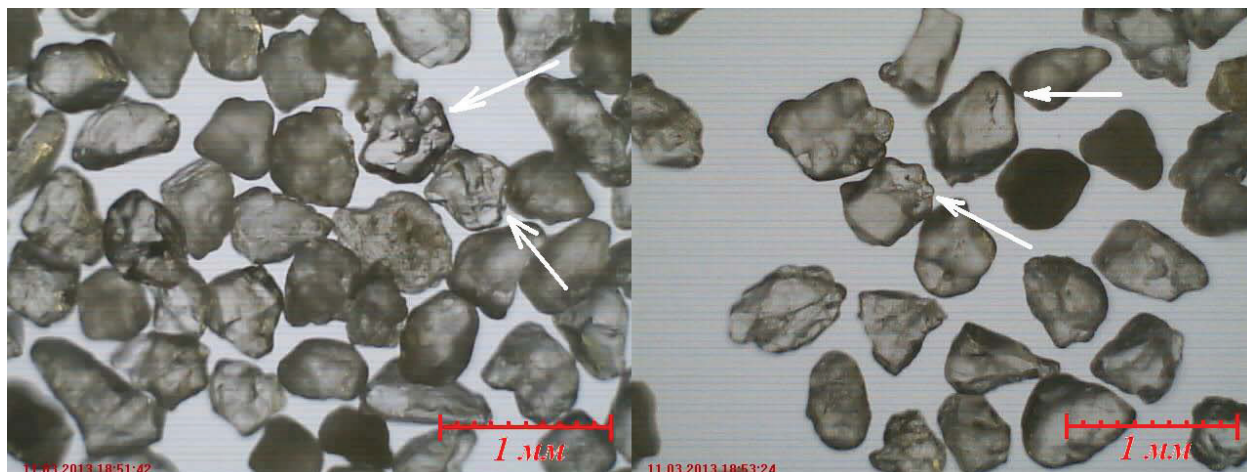


Рис. 9. Кварцевый песок после дробления. Фракция 0.325-0.5 мм

Анализ результатов

Разряд использованного в работе конденсатора 80 мкФ 3 КВ достаточен для измельчения кварцитной крошки с размером частиц 3-6 мм, однако не оказал влияния на кварцевый песок фракции 0.325-0.5 мм. Параметры разряда конденсатора 0.5 мкф 10 КВ позволяют измельчать фракцию 0.325-0.5 мм. Однако при попытке рассчитать давление в канале разряда по формуле (6), исходя из времени разряда 5 мкс и размера наиболее крупных частиц 0.5 мм, получаем физически недостижимое давление. Это говорит либо о том, что время спада ударной волны гораздо меньше времени разряда, либо что механизм откольного разрушения не участвует в дроблении мелких частиц. Результаты расчётов данной работы могут быть уточнены с учётом фокусировки волн разряжения в частице исходя, например, из её сферической формы.

Фракционный состав образцов показывает, что дробление происходит лишь в малой по сравнению с объёмом камеры области, причём продукт дробления образуется сразу в широком спектре размеров.

Более эффективно дробление прошло в камере небольшого размера с жёсткими стенками, несмотря на большое расстояние до свободной поверхности воды. Таким образом, кавитация вблизи свободной поверхности не является основным механизмом дробления частиц с начальным размером 0.5 мм.

Заключение

Исходя из сделанных предположений о связи формы ударной волны и длительности разряда, механизм откола под действием первичной и вторичных волн сжатия в жидкости, сформированных импульсным электрическим разрядом, не позволяет дробить частицы кварца с начальным размером 0.5 мм. Дробление прочных

монокристаллических материалов происходит в небольшом объёме в непосредственной близости к разрядному каналу. Кавитационные процессы на свободной поверхности жидкости не вносят значительного вклада в измельчение. Предположительно, основную роль играет взаимное столкновение частиц между собой и стенками рабочей камеры. Для эффективного дробления необходимы короткие разряды высокой интенсивности, получаемые с использованием напряжений десятки КВ, производимые непосредственно в водной взвеси измельчаемого материала. При этом размеры полученного порошка находятся в широких пределах.

Список литературы

1. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. /Л.: Машиностроение, –1986 г. –253 с.
2. Гулый Г.А. Малюшевский П.П. Высоковольтный электрический разряд в силовых импульсных системах./ АН Киев: Наукова думка,–1977.–175 с.
3. Бескаравайный Н.М. Поздеев В.А. Теоретические основы измерения импульсных давлений в жидких средах. / АН Киев: Наукова думка,–1981.–192 с.
4. Физика взрыва. Том 2. 3е изд. /С.Г. Андреев [и др.]; Под ред. Л.П. Орленко/ М: Наука, –2004 г.–651с.
5. Волна давления при наносекундном электрическом взрыве вольфрамового проводника в воде/ А.В.Павленко [и др.] // Письма в Журнал технической физики. 2008 г.–том 34.–вып.3.–с.89
6. Физические свойства минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах./ Е.И. Батюк [и др.] – М.: Недра, –1988 год. – 255 с.
7. Бартенев Г.М. Строение и механические свойства неорганических стекол М., издательство литературы по строительству – 1966 г., 216 с.
8. Справочник физических свойств горных пород./ Под ред. Н.В. Мельникова и др. / М: Недра, – 1975 г. –279 с.
9. Григорьев А. Л. Формирование ударных волн импульсными электрическими разрядами в воде и исследование их воздействия на преграды. Автореферат диссертации на соискание учёной степени канд. техн. наук. Москва, –2007.–30 с.
10. Виноградов Б.В. и др. Особенности гидродинамических процессов при импульсном электрическом разряде в ограниченном объёме жидкости// Вопросы химии и химической технологии.–Днепропетровск, УДХТУ, –2004, –№2 –С. 190-192.