

ДРОБЛЕНИЕ БАЗАЛЬТА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

М.Е. Журковский, П.А. Жигульский, А.Н. Блазнов

Целью работы являлось создание маломощной электрогидравлической установки и её апробация применительно к дроблению базальта. В работе представлены результаты исследования фракционного состава частиц базальта, полученных путем электрогидравлического дробления. Показана эффективность разработанной установки. Дробленные частицы приобретают округлую форму, без острых углов. Дальнейшее разделение по фракциям заданных размеров возможно гидростатическим и ситовым методом.

Ключевые слова: дробление, электрогидравлическая обработка, базальт, суспензия, дифференциальная функция, интегральная функция, весовое распределение частиц по размерам.

ВВЕДЕНИЕ

Электрогидравлический эффект был открыт советским ученым и изобретателем Л.А. Юткиным в 30-х годах XX века. Сущность явления электрогидравлического эффекта состоит в том, что в зоне сформированного импульсного высоковольтного разряда в жидкой среде возникают высокое гидравлическое давление и температура, которые сопровождаются ударными волнами, импульсными кавитационными процессами, мощными электромагнитными полями, приводящими в итоге к разрушению частиц в жидкой среде [1, 2].

Данное явление позволяет строить различные установки для разрушения материалов, штамповки металлов, очистки отливок, получения удобрений из почвы, перемешивания жидкостей, получения коллоидных растворов, ускорения химических реакций, транспортирования веществ и т.д.

В электрогидравлических установках сетевое напряжение в зависимости от режима обработки повышается от 10 до 70 кВ и более и через выпрямитель подается на конденсатор. При достижении на конденсаторе напряжения пробоя формирующего воздушного промежутка происходит электрический разряд в жидкости (рисунок 1).

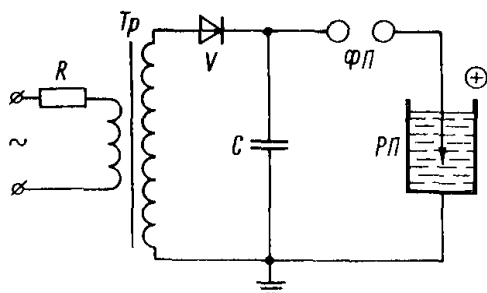


Рисунок 1 – Принципиальная схема электрогидравлической установки

Целью работы являлось создание маломощной электрогидравлической установки и её апробация применительно к дроблению базальта.

В качестве высоковольтного трансформатора взят ТДКС от элементов развертки ламповых телевизоров, в который уже встроен выпрямительный диод. Для реализации электрической части установки применен ЛАТР и понижающий трансформатор для регулировки входного напряжения в диапазоне 10–15 В. На микросхеме NE555 построена схема генерации прямоугольных импульсов с частотой 18 кГц и скважностью 52 %. В качестве рабочего использовался конденсатор К75-29 номиналом 40 кВ * 0,25 мкФ.

Параллельно рабочему конденсатору подключен делитель напряжения для измерения параметров работы установки и снятия остаточного напряжения с конденсатора.

Общий вид электрогидравлической установки представлен на рисунке 2.

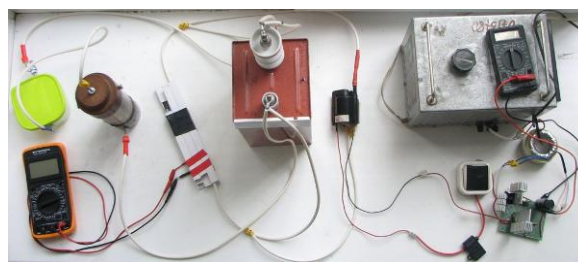


Рисунок 2 – Общий вид электрогидравлической установки

Рабочие характеристики установки: напряжение до 30 кВ, мощность 11,2 Вт, КПД установки = 50 %.

Рабочее напряжение конденсатора 26 кВ. Таким образом, запасаемая в конденсаторе энергия: $E_k = C \cdot U^2 / 2 = 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot (26 \cdot 10^3)^2 / 2 =$

84,5 Дж. В данном случае режим электрогидравлического разряда можно отнести к «среднему» [1]. Опыты показали, что в разряд уходит порядка 95 % запасаемой энергии конденсатора. Таким образом, энергия разряда составляла: $E_p = 84,5 \cdot 0,95 = 80,3$ Дж.

Рабочая емкость изготовлена из нержавеющей стали рабочим объемом 0,27 л, которая является отрицательным электродом (рисунок 3). Крышка выполнена из текстолита и одевается на стакан через резиновую прокладку.

Положительный электрод представляет собой шпильку из нержавеющей стали диаметром 4 мм со скруглением на рабочем конце. В качестве изоляции использовалась силиконовая трубка толщиной 1 мм, которая не доходит до конца электрода на 3–5 мм. Благодаря этому она не разрушается от воздействия ударных волн, однако возникают дополнительные потери на стадии стекания тока. Опыты показали её высокую надежность в данной установке.

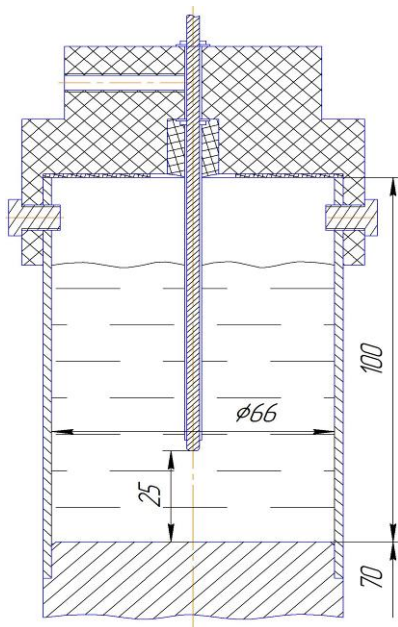


Рисунок 3 – Рабочая емкость установки

Оптимальное расстояние δ искрового промежутка в мм определяется по следующей формуле [3]:

$$\delta = 0,06 \times U^2 \times \sqrt[8]{C}, \quad (1)$$

где U – напряжение пробоя, кВ; C – емкость накопительного конденсатора, мкФ.

Как видно из формулы, расстояние искрового промежутка в значительной степени зависит от напряжения. Для стабильности разряда при плотном заполнении объема жидкости различными телами и частицами (например, при дроблении материалов) следует делить δ на коэффициент $k = 1,2-1,4$.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения экспериментов использовали базальт Костопольского месторождения фракции 7–11 мм массой 314 грамм. Количество импульсов составило 963. Таким образом, энергия обработки составила 77,3 кДж или 0,021 кВт*ч. В расчете на массу обрабатываемого материала энергия составляет 246,2 кДж/кг или 0,068 кВт*ч/кг.

Для сравнения результатов электроимпульсного дробления с другими (механическими) способами дробления представляет интерес исследовать гранулометрический состав получаемого продукта.

С целью определения дисперсного состава были отобраны пробы до и после электрогидравлической обработки. Поскольку электроимпульсная обработка проводилась в водной среде, наиболее мелкие частицы оказались взвешенными и были удалены вместе с жидкостью. Для дальнейшего упрощения измерений исследования пробы высушивались. Из-за большого разброса дисперсности полученный материал делился на ситах на крупную фракцию: размером более 1 мм, среднюю: менее 1 мм и мелкую (суспензию), образовавшуюся при дроблении. Измерение размеров частиц проводили оптическим методом с помощью оптического микроскопа и встроенной в окуляр цифровой камеры, для крупных частичек – цифрового фотоаппарата, суспензию исследовали на приборе PIP 9.0. Некоторые характерные фотоснимки исходного и обработанного базальта показаны на рисунке 4.

Частицы после электрогидравлической обработки имеют неправильную форму с округлыми краями, разнообразны по размерам. Самые крупные частицы достигают размеров 10 мм. Наиболее мелкие частицы имеют размеры до нескольких микрон. По фотоснимкам определили количество частиц, попавших в заданный интервал размеров. Количественный состав приведен в таблицах 1–3

ДРОБЛЕНИЕ БАЗАЛЬТА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

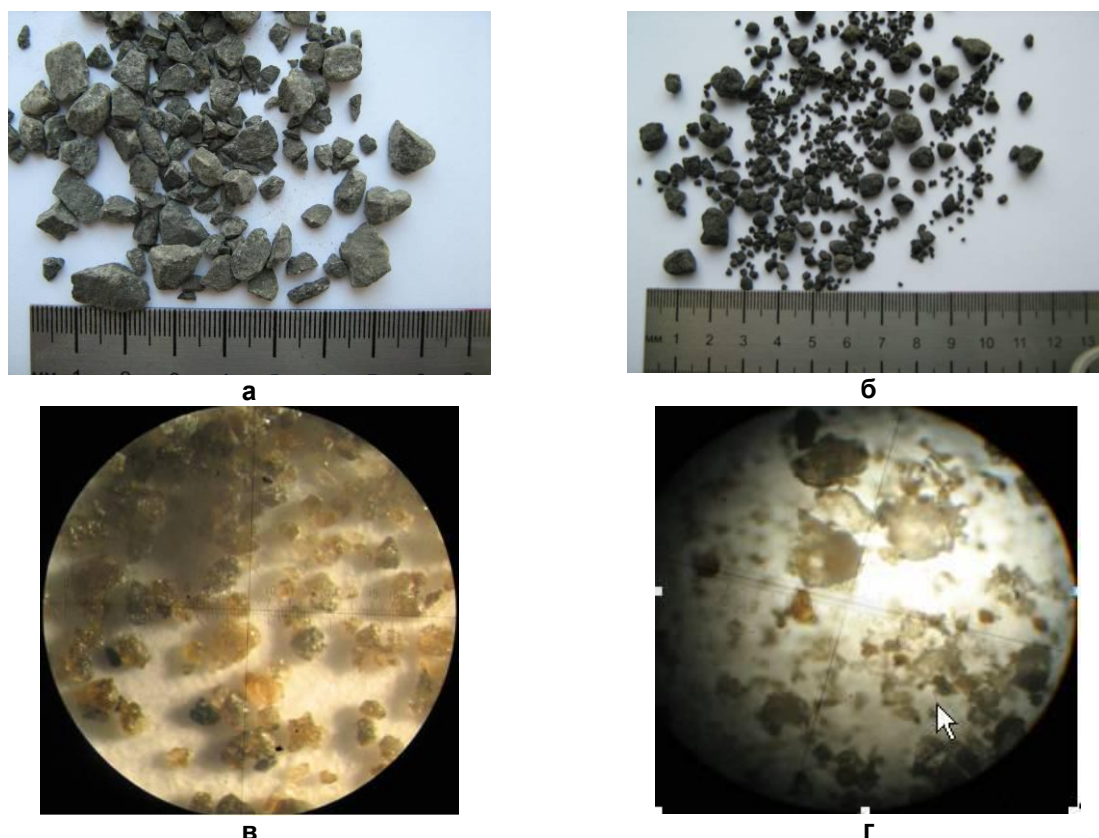


Рисунок 4 – Характерные фотографии исходного базальта (а) после электрогидравлической обработки разбитого на фракции: крупной (б), средней (в): увеличение $\times 7$, цена деления 14 мкм, высушенной суспензии (г): увеличение $\times 10$, цена деления 7,46 мкм

Таблица 1 – Количественное распределение исходных частиц по размерам

№ пробы	Диапазон размеров частиц, мм									
	(1–2]	(2–3]	(3–4]	(4–5]	(5–6]	(6–7]	(7–8]	(8–9]	(9–10]	(10–11]
1	8	21	24	26	16	13	5	0	2	1
2	5	13	5	22	9	10	10	7	4	3
3	8	5	12	14	14	17	9	5	4	1

Таблица 2 – Количественное распределение по размерам частиц больше 1 мм

№ пробы	Диапазон размеров частиц, мм								
	(1–2]	(2–3]	(3–4]	(4–5]	(5–6]	(6–7]	(7–8]	(8–9]	(9–10]
1	87	21	11	1	4	2	0	0	0
2	132	97	37	17	8	3	2	2	0
3	201	82	27	8	2	2	1	1	2

Таблица 3 – Количественное распределение по размерам частиц менее 1 мм

№ пробы	Диапазон размеров частиц, мкм												
	(0–50]	(50–100]	(100–150]	(150–200]	(200–250]	(250–300]	(300–350]	(350–400]	(400–450]	(450–500]	(500–600]	(600–700]	(700–1000]
1	15	45	127	75	37	12	5	3	2	2	2	1	2
2	8	73	107	61	39	18	4	8	2	3	1	2	2
3	1	80	121	53	34	20	9	3	4	1	0	1	1

Для расчета массообменных процессов в полидисперсных системах обычно используют объемное содержание и состав дисперсной фазы, либо некоторые осредненные параметры, определяющие размер частиц [6]. В литературе в качестве таких параметров для газо- и жидкодисперсных систем (эмульсий) используют средний арифметический d_{10} , средний поверхностный d_{20} , средний объемный d_{30} [7] и средний объемно-поверхностный диаметр d_{32} [6, 8]. В общем виде уравнение для определения всех этих величин можно записать следующим образом [7]:

$$d_{mn} = \left[\frac{\sum n_i d_{qi}^m}{\sum n_i d_{qi}^n} \right]^{1/m-n}, \quad (2)$$

где n_i – число частиц, попавших в заданный интервал; d_{qi} – значение диаметра частицы дисперсной фазы соответствующее середине интервала; m, n – показатели, целые числа от 0 до 4.

Для оценки полидисперсных суспензий и сыпучих продуктов интерес представляет не количественное, а массовое распределение твердых частиц по размерам. Массовое рас-

пределение пропорционально объемному, которое будем определять через d^3 , если принять частицу близкой к форме шара. При этом функция вероятности распределения при обработке экспериментальных данных определяется по выражению [9]:

$$F(d_q) = \frac{n_i d_{qi}^3}{\sum n_i d_{qi}^3}, \quad (3)$$

где n_i – число частиц, попавших в заданный интервал; d_{qi} – значение диаметра частицы твердой фазы, соответствующее середине интервала.

Плотность распределения вероятности может быть выражена как весовая функция:

$$f(d_q) = \frac{n_i d_{qi}^3}{\Delta d_{qi} \sum n_i d_{qi}^3}, \quad (4)$$

где Δd_{qi} – ширина интервала.

Осредненные результаты обработки экспериментальных данных по выражениям (3)–(4) приведены в таблицах 4–6 и показаны на рисунках 5–7 в виде интегральной и дифференциальной весовой функции распределения.

Таблица 4 – Весовое распределение исходных частиц по размерам

Диапазон размеров частиц, мм	(1–2]	(2–3]	(3–4]	(4–5]	(5–6]	(6–7]	(7–8]	(8–9]	(9–10]	(10–11]
Количество	21	39	41	62	39	40	24	12	10	5
$F, \%$	0,12	1,04	3,01	9,66	11,10	20,58	17,32	12,61	14,67	9,90
$f, \%/мм$	0,12	1,04	3,01	9,66	11,10	20,58	17,32	12,61	14,67	9,90

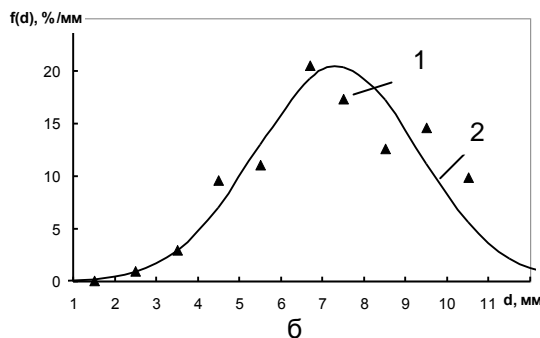
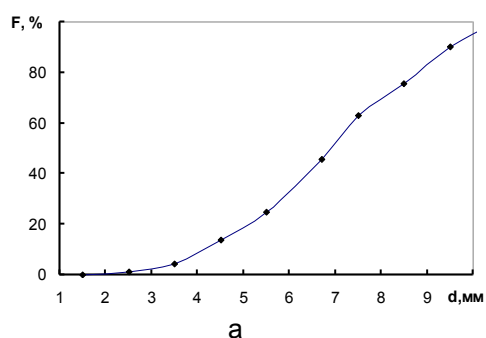


Рисунок 5 – Интегральная (а) и дифференциальная весовые функции распределения по размерам исходных частиц: 1 – эксперимент, 2 – расчетная кривая нормального распределения

Таблица 5 – Весовое распределение частиц по размерам для фракции больше 1 мм

Диапазон размеров частиц, мм	(1–2]	(2–3]	(3–4]	(4–5]	(5–6]	(6–7]	(7–8]	(8–9]	(9–10]
Количество	420	200	75	26	14	7	3	3	2
$F, \%$	7,31	16,12	16,59	12,22	12,02	10,86	6,53	9,50	8,85
$f, \%/мм$	7,31	16,12	16,59	12,22	12,02	10,86	6,53	9,50	8,85

ДРОБЛЕНИЕ БАЗАЛЬТА ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

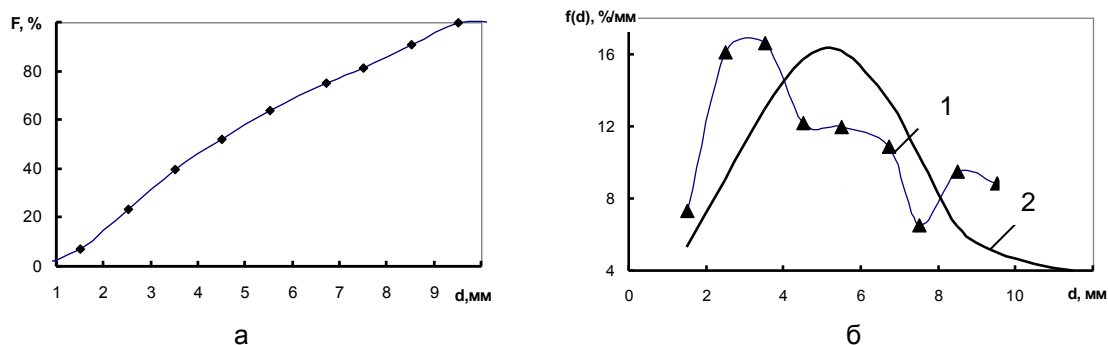


Рисунок 6 – Интегральная (а) и дифференциальная весовые функции распределения по размерам частиц больше 1 мм: 1– эксперимент, 2 – расчетная кривая нормального распределения

Таблица 6 – Весовое распределение частиц по размерам для фракции меньше 1 мм

Диапазон размеров частиц, мкм	(0–50]	(50–100]	(100–150]	(150–200]	(200–250]	(250–300]	(300–350]	(350–400]	(400–450]	(450–500]	(500–600]	(600–700]	(700–1000]
Количество	24	198	355	189	110	50	18	14	8	6	3	4	5
F, %	0,00	0,80	6,66	9,74	12,04	10,00	5,94	7,10	5,90	6,18	4,80	10,56	20,28
f, %/мкм	0,00	0,02	0,13	0,19	0,24	0,20	0,12	0,14	0,12	0,12	0,05	0,11	0,20

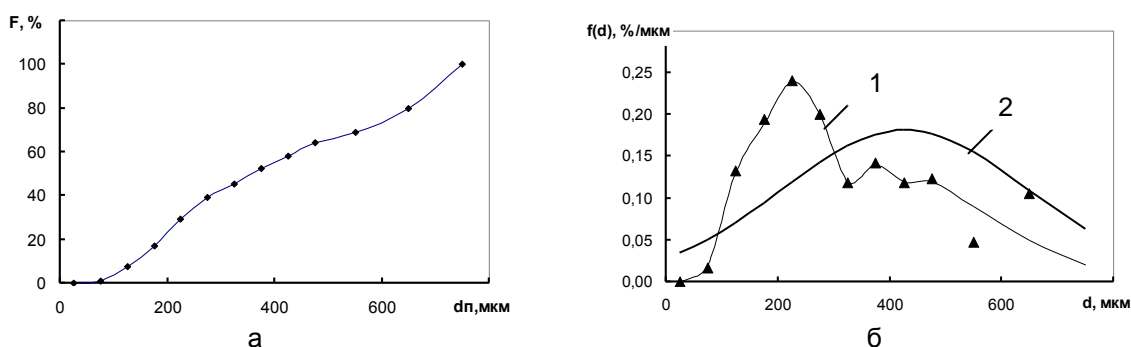


Рисунок 7 – Интегральная (а) и дифференциальная весовые функции распределения по размерам частиц менее 1 мм: 1– эксперимент, 2 – расчетная кривая нормального распределения

В литературе для теоретической оценки плотности распределения используют законы нормального, бинормального распределения и другие [9]. Расчетная функция плотности нормального распределения определяется по формуле:

$$f(d_q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_q} \exp\left(-\frac{(d_{qi} - \bar{d}_q)^2}{2\sigma_q^2}\right), \quad (5)$$

где \bar{d}_q – средний диаметр частиц дисперсной фазы; σ_q – среднеквадратическое отклонение диаметров частиц дисперсной фазы от среднего значения.

Средний размер частицы в выражении (5) определяется по формуле:

$$\bar{d}_q = \frac{\sum n_i d_{qi}^4}{\sum n_i d_{qi}^3}. \quad (6)$$

Величина квадрата среднеквадратического отклонения (дисперсия) определяется по формуле:

$$\sigma_q^2 = \frac{\sum n_i d_{qi}^5}{\sum n_i d_{qi}^3} - \left(\frac{\sum n_i d_{qi}^4}{\sum n_i d_{qi}^3}\right)^2. \quad (7)$$

На рисунках 5–7 приведены расчетные кривые нормального распределения. Видно, что наиболее близко экспериментальные данные сходятся с расчетными для исходных частиц базальта (рисунок 5). Для дробленых частиц экспериментально полученные функции распределения заметно отличаются от нормального.

На рисунке 8 приведены характерная фотография и функции распределения взвешенных частиц, исследованных на приборе РІР 9.0. По данным следует, что в суспензии присутствуют частицы размером до 20 мкм.

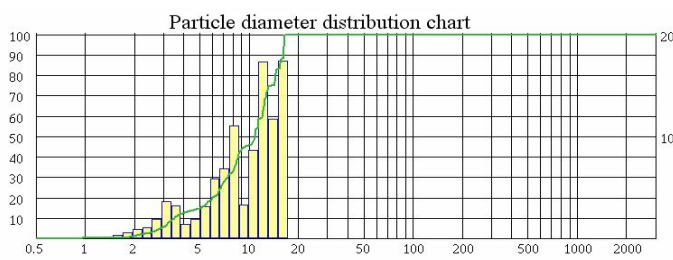
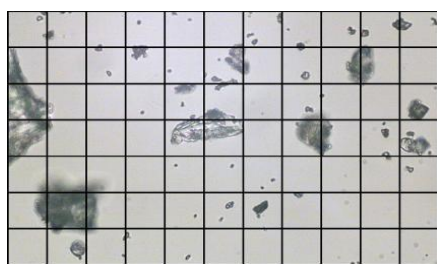


Рисунок 8 – Характерная фотография на приборе PIP 9.0. частиц суспензии (а) и распределение их по размерам (б)

Полученные данные о распределении частиц базальта по размерам после дробления позволяют решить вопрос о разделении частиц на фракции заданного размера: поскольку процесс электрогидравлического дробления происходит в жидкой среде, самые мелкие взвешенные частицы отделяются за счет гравитации, а более крупные – с помощью сит.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создана маломощная электрогидравлическая установка и апробирована применительно к дроблению базальта.
2. Особенностью электрогидравлического дробления базальта, является то, что получаемые частички имеют сглаженные края и сравнительно большую округлость, без острых граней.
3. Проведены гранулометрические исследования. Построены интегральные и дифференциальные весовые функции распределения по размерам частиц. Показано, что исходная фракция соответствует нормальному закону распределения, тогда как распределение дробленых частиц по размерам отличается от нормального.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юткин, Л. А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1986. – 253 с.
2. Наугольных, К. А. Электрические разряды в воде / К. А. Наугольных, Н. А. Рой – М.: «Наука», 1971. – 155 с.
3. Гаврилов, Г. Н. Разрядноимпульсная технология обработки минеральных сред / Г. Н. Гаврилов. – Киев: Наук. думка, 1979. – 164 с.
4. Жигульский, П. А. Разработка лабораторной установки для дробления хрупких материалов на основе электрогидравлического эффекта // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием (18–20 мая 2016 г., г. Бийск) / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2016. – С. 190–192.
5. Жигульский, П. А. Установка для электрогидравлической обработки материалов // Перспективы создания и применения конденсированных

высокоэнергетических материалов: материалы докладов VI Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых 15–16 сентября 2016 г. – Бийск: РОАК ООП «Общероссийское литературное сообщество», 2016. – С. 233–236.

6. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / пер. с польск. под ред. И. А. Щупляка. – Л., «Химия», 1975.
7. Zhou, G. Evolution of drop size distribution in liquid-liquid dispersions for various impellers / G. Zhou, S. M. Kresta // Chem. Eng. Sci. – 1998. – Vol. 53, № 11. – P. 2099–2113.
8. Блазнов, А. Н. Диспергирование и коалесценция в жидкостно-газовых струйных аппаратах с удлиненной камерой смешения / А. Н. Блазнов, В. А. Куничан, Д. В. Чащилов // Журнал прикладной химии. – 2001. – № 4. – С. 621–625.
9. Блазнов, А. Н. Распределение пузырьков по размерам в жидкостно-газовых струйных аппаратах с удлиненной камерой смешения / А. Н. Блазнов, Ю. Н. Денисов, В. А. Куничан, Д. В. Чащилов // Электронный журнал "Исследовано в России". – 2002. – № 14. – С. 151–161, <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2002/014.pdf>.

Журковский Максим Евгеньевич, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории Материаловедение минерального сырья, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел.: 8-(3854) 30-59-06, e-mail: labmineral@mail.ru.

Жигульский Петр Александрович, старший преподаватель инженерного специализированного факультета (ИСФ) кафедры ракетных двигателей и высокоэнергетических устройств автоматических систем (РДВУАС), Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ), тел.: 8-(3854) 30-32-01, e-mail: petr@bti.secna.ru.

Блазнов Алексей Николаевич, д.т.н., доцент, зав. лабораторией Материаловедение минерального сырья, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), тел.: 8-(3854) 30-58-82, e-mail: blaznov74@mail.ru.