

СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА НАНОРАЗМЕРНЫХ И МЕЗОСКОПИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

PACS numbers: 52.80.Mg, 52.80.Qj, 52.80.Wq, 62.50.Ef, 83.80.Fg, 83.80.Nb

К вопросу о совершенствовании технологии комплексного извлечения редких и рассеянных металлов электроимпульсным методом

Б. Р. Нусупбеков, К. Кусаиынов, С. Е. Сакипова, А. К. Хасенов,
А. Ж. Бейсенбек

*Карагандинский государственный университет им. Е. А. Букетова,
ул. Университетская, 28,
100028 Караганда, Казахстан*

В статье рассматриваются преимущества электроимпульсной обработки техногенного сырья и руды по сравнению с другими механическими методами дробления и измельчения. Описаны характеристики электроимпульсной технологии, позволяющей получать дисперсные продукты с заданными свойствами. Приведена схема дробильного узла. Экспериментально определены оптимальные параметры электроимпульсной установки для эффективного дробления и измельчения проб из двух рудных месторождений Казахстана. Показано, что электроимпульсная обработка позволила на стадии обогащения значительно увеличить содержание меди в исследуемых образцах.

У статті розглядаються переваги електроімпульсної обробки техногенної сировини і руди в порівнянні з іншими механічними методами дроблення та подрібнення. Описано характеристики електроімпульсної технології, що уможливує одержувати дисперсні продукти з заданими властивостями. Наведено схему дробильного вузла. Експериментально визначено оптимальні параметри електроімпульсної установки для ефективного дроблення та подрібнення проб з двох рудних родовищ Казахстану. Показано, що електроімпульсна обробка уможливила на стадії збагачення значно збільшити вміст міді в досліджуваних зразках.

The advantages of electropulse technology for processing of technogenic raw materials and copper ore as compared with other mechanical methods of crushing and grinding are discussed. The characteristics of electrotechnology, which allows obtaining disperse products with the desired properties, are described. The diagram of the crushing unit is shown. The optimal parameters for efficient electroinstallation of crushing and grinding of samples

from two ore deposits in Kazakhstan are experimentally determined. As shown, the electric pulse treatment allows increasing significantly the copper content of these samples, during the enrichment stage.

Ключевые слова: медная руда, техногенное сырье, дробление, степень измельчения, дробильный узел, электроимпульсная технология.

(Получено 12 июля 2013 г.; окончат. вариант — 12 февраля 2014 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие электротехнической и электронной промышленности повысило актуальность использования цветных, редких и рассеянных металлов, потребность в которых постоянно возрастает. Их извлечение из руд связано со значительными финансовыми затратами и трудоемкостью. Кроме того, высокие требования к технологиям извлечения диктуются со стороны экологов и организаций, занимающихся вопросами природопользования. Последнее связано и с необходимостью использования бедных месторождений технических металлов. Это объясняет, почему все больше внимания в последние десятилетия уделяется разработке безотходных экологически чистых методов, которые, в частности, успешно развиваются в Украине и Казахстане. В качестве примера можно упомянуть высокоэффективную схему переработки уникального Мазуровского (Украина) месторождения с извлечением ряда стратегических металлов и сопутствующих им технических металлов [1–3]. Высокая стоимость товарного производства металлов методами гидрометаллургии заметно повышена за счет применения необходимых этапов подготовки производства, к которым относятся и совершенствование техники, технологии и оборудования для обогащения сырья с целью значительного расширения и вовлечения в переработку новых месторождений благородных, редких и цветных металлов. Как правило, содержание ценных компонентов в рудах, как и в концентратах, выделяемых из отвальных хвостов, очень низкое. Поэтому полноценное извлечение ценных металлов из руды не может быть осуществлено без применения современных методов ее обогащения. Для повышения степени извлечения металлов и обеспечения комплексности использования техногенного сырья применяются более совершенные методы селективной флотации, которые пока что являются основным резервом в производстве цветных металлов и, в известной степени, определяют эффективность переработки концентратов [4].

Одной из наиболее энергоемких и трудозатратных стадий переработки рудного сырья является получение его фракций требуемой степени дисперсности, что важно на этапах как обогащения, так и последующей переработки, например, с целью ускорения кислот-

ной размывки пульпы с образованием солей извлекаемых металлов и другой товарной продукции в гидрометаллургии.

Минеральное сырье в ходе первичной переработки подвергается ряду последовательных операций, условно разделяемых на подготовительные, обогатительные и вспомогательные, в частности, обезвоживание, сгущение и сушка. Для доведения сырьевого материала до необходимой крупности руда сначала подвергается дроблению и измельчению с разделением по классам крупности методом грохочения [4]. При обогащении руд методами механической обработки химический состав остается без изменений, меняются лишь соотношения между ценными минералами и пустой породой в исходном сырье и продуктах обогащения.

Сырье из горных выработок поступает на обогатительные фабрики в виде дисперсных фракций с различными размерами: для открытых горных выработок — 1200–1500 мкм, для подземных — 600–800 мкм. Поэтому подготовительные процессы дробления и измельчения проводят в несколько стадий. Первоначальному дроблению подвергаются руды до крупности кусков с размерами 100–300 мкм, затем среднему — от 30–100 мкм и мелкому — от 5–25 мкм. Для этого используются разнообразные механические дробилки: щековые, конусные, валковые, ударные и др. [4–5].

После стадии дробления руда направляется на сухое или мокрое измельчение, которое является заключительной операцией в цикле подготовки руды к обогащению. Процесс измельчения производится с помощью барабанной мельницы, после чего техногенное сырье содержит дисперсные фракции с величиной крупности от 0,2 до 5,0 мм.

Как уже упоминалось, основными недостатками данных дробилок и мельниц являются высокая энергоемкость и небольшая степень дробления. К тому же при длительной эксплуатации мелющие шары и стержни изнашиваются. Это приводит к деформации их поверхности и изменению формы, что ухудшает процесс измельчения и последующего обогащения. Поэтому периодически производится пересортировка шаровой загрузки. Такая операция обычно совмещается с пересортировкой барабана мельницы для замены износившейся футеровки с остановкой мельницы на профилактическое обслуживание. Пересортировка шаров производится не реже одного раза в 2–3 месяца. Все это снижает производительность механических методов дробления твердых руд и техногенного сырья. Подробное описание технологических процессов приведено для того, чтобы показать, что известные механические способы обработки руд и концентратов редких, благородных и цветных металлов и действующие промышленные установки требуют больших затрат энергии, не обеспечивают полное измельчение чистого продукта, и не удовлетворяют требованиям по экологии и экономичности. Кро-

ме того, многостадийность операции измельчения рудного сырья приводит к существенному удорожанию товарной продукции.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Поскольку большинство полиметаллических руд цветных металлов представляют собой сравнительно бедные породы, необходимо их предварительно обогащать. От содержания металлов в перерабатываемом сырье зависят основные показатели металлургического предприятия, такие как производительность, трудовые затраты, расход топлива, электроэнергии и вспомогательных материалов, полнота извлекаемых металлов и, в итоге, себестоимость готовой продукции.

В случае использования методов гидрометаллургии для повышения комплексности переработки сырья и его обогащения необходимо получать его в виде дисперсной фракции, определяющей кинетику ее растворения в кислотах. Это делает необходимым поиск эффективных способов измельчения руды. В настоящей работе предлагается способ измельчения руды, который основан на использовании энергии импульсной ударной волны, возникающей в результате искрового электрического разряда в жидкости, который позволяет решить ряд проблем, связанных с измельчением минерального сырья. Он разработан в лаборатории Физики импульсных явлений в гетерогенных средах кафедры инженерной теплофизики им. проф. Ж. С. Акылбаева Карагандинского государственного университета имени Е. А. Букетова. В его основу положен электрогидравлический эффект Юткина [6–9], широко используемый в химической и перерабатывающей промышленности.

Как показывают проведенные эксперименты, данный способ дробления экономичен, экологически чист, легко встраивается в любую технологическую цепь. Сущность и отличительная особенность предлагаемой технологии в том, что обработка руды и техногенного сырья с использованием энергии давления, выделяемой при электрогидравлическом воздействии, позволяет получать быстро измельченный и легко очищенный от нежелательных примесей продукт заданной дисперсности, который затем можно непосредственно использовать для последующего обогащения.

Электроимпульсное дробление является эффективным способом измельчения различных материалов, который позволяет получать продукт с заданной степенью измельчения с определенным гранулометрическим составом и обладает высокой избирательностью дробления. Технологический процесс электроимпульсного измельчения легко поддается автоматизации. Для обслуживания электроимпульсных установок не требуется большого числа высококвалифицированных рабочих. В электроимпульсных дробилках можно

дробить и измельчать практически любые твердые материалы [10].

Кроме того, электроимпульсные устройства в отличие от механических дробилок не имеют движущихся частей, изготавливаются из обычной конструкционной стали. Их корпус практически не изнашивается во время эксплуатации. При работе эти устройства не образуют пыли, занимают сравнительно небольшие производственные площади и допускают совмещение в них процессов дробления, смешения и флотации материалов. Рабочей средой в электрогидравлических дробилках может служить любая жидкость, в основном техническая вода. Физические процессы, сопровождающие электрический разряд в водных растворах дисперсных сред, изучены и описаны в работах [6–9].

Принципиальная схема электроимпульсной установки содержит пульт управления для контроля и управления работой, позволяющий устанавливать различные режимы работы установки, а также контролировать сам процесс измельчения. Электрическая схема управления содержит четыре однозвенных индуктивно-емкостных фильтра, предназначенных для фильтрации токов больших частот и амплитуд. Пульт управления установки обеспечивает включение и отключение рабочего режима, регулировку частоты следования импульсов разряда на воздушном разряднике, сигнализацию включения рабочего режима, наличие питающего напряжения и контроль основных параметров. При прохождении мощного импульса в жидкостной среде, представляющей собой увлажненную руду, создается электрический пробой, сопровождающийся гидравлическим ударом большой разрушительной силы [10–12].

Важнейшим элементом высоковольтной коммутации является регулируемый разрядник. Данный элемент оборудования обеспечивает стабильную работу установки на различных режимах работы и по напряжению и по частоте. Необходимость его применения диктуется тем, что напряжение пробоя рабочей среды (техническая вода) намного ниже, чем напряжение, необходимое для работы аппарата. При пробое воздушного зазора высокий разрядный ток высокой плотности подается на рабочий промежуток. При этом появляется возможность подавать на рабочий промежуток необходимые напряжения. Регулировать рабочее напряжение с необходимой точностью можно, увеличивая или уменьшая воздушный зазор в регулируемом разряднике [8]. Для этого электроимпульсная установка содержит специальный разрядник с регулируемым межэлектродным расстоянием, которое определяется выбранным режимом работы [10].

Измельчительный узел электроимпульсной установки выполнен в виде коаксиальных труб из нержавеющей стали. Общая схема дробильно-измельчительного узла электроимпульсной установки представлена на рис. 1.

ния продукта после измельчения по классам крупности [10, 11].

Отличительной чертой при использовании электрического разряда в жидкости является то, что преобразование электрической энергии в механическую энергию происходит с непосредственной трансформацией электрической энергии в энергию давления ударных волн с высоким коэффициентом полезного действия установки при надежной долгосрочной ее работе.

Параметры электрического разряда и свойства жидкостей являются теми факторами, которые влияют на скорость и количество выделяемой в зоне электрического разряда кинетической и тепловой энергии. При этом за счет плазмообразования в жидкости в зоне электрического разряда и в электродуговом промежутке за счет пинч-эффекта в жидкости возникает ударная волна. Ее могут вызывать как одиночные импульсы электрического разряда, так и серия последовательных импульсов. Мощность электрического разряда регулируется емкостью конденсаторных батарей [8, 9].

При электроимпульсном разрушении материала можно путем варьирования параметров одиночных импульсов или их серий изменять гранулометрический состав продукта. Исследование возможности влиять на размерные характеристики готового продукта были проведены на минеральном сырье, в качестве которого были выбраны медно-песчаниковые руды Центрального Казахстана, содержащие халькопирит, халькозин и борнит.

3. ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для проведения научно-исследовательских работ была использована природная руда крупнейших месторождений Казахстана — Анненского и Нурказганского рудников. В проведенных экспериментах исходный диаметр медной руды в среднем составил $5 \cdot 10^{-3}$ м. Дробление и измельчения руды проводились при следующих параметрах электроимпульсной установки: разном количестве разрядных импульсов $N = 50, 750, 1000$ и 1250 (рис. 2) с изменением энергии разряда W (от 65 до 200 Дж) в межэлектродных промежутках на коммутационном устройстве ($l = 8, 10, 12$ и 14 мкм) и при емкостях конденсаторных батарей $C = 0,25, 0,5, 0,75$ мкФ (рис. 3).

На рисунке 2 показана зависимость степени измельчения ($K, \%$) медной руды из Анненского и Нурказганского рудников до дисперсного продукта с диаметром частиц, равным $0,2 \cdot 10^{-3}$ м. Результаты получены при емкости конденсатора $C = 0,5 \cdot 10^{-6}$ Ф, числе импульсных разрядов $N = 1000$, диаметре исходной фракции $5 \cdot 10^{-3}$ м. При этом, для медной руды (после обработки) Анненского месторождения в среднем получено 28% продукта в виде порошка с заданной степенью дисперсности, а для руды месторождения Нурказган — 37% (рис. 4).

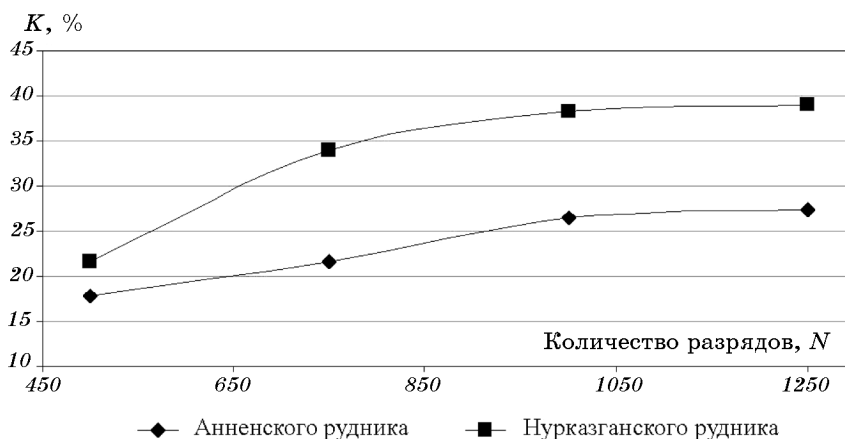


Рис. 2. Зависимость содержания меди в руде после измельчения Анненского (◆) и Нурказганского (■) месторождений от количества разряда конденсаторной батареи.

Во время проведения экспериментальных исследований на электроимпульсной установке было также обработано техногенное сырье из отходов медной руды, полученной из Жезказганской обогатительной фабрики. Анализ качественного и количественного элементного состава техногенного отхода медной руды до и после обработки на электроимпульсной установке проведен на растровом электронном микроскопе-микроанализаторе РЭММА-2000.

Химический анализ позволил сравнивать элементный состав техногенного отхода медной руды, обработанной на электроимпульсной установке с аналогичными показателями руды, измель-

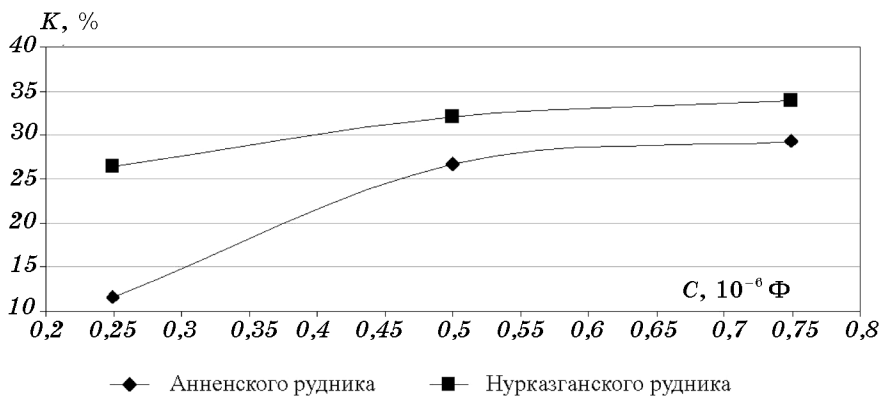


Рис. 3. Относительное изменение содержания меди после измельчения руды от емкости конденсаторной батареи ◆, ■ — то же, что и на рис. 2.

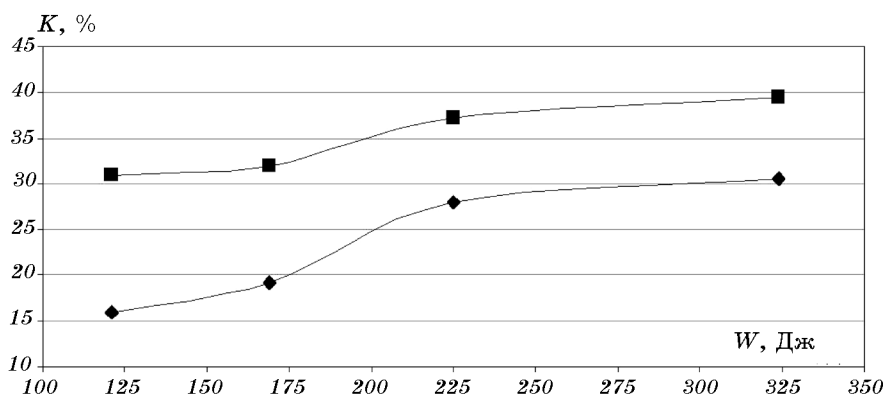


Рис. 4. Относительное изменение содержания меди в руде от энергии разряда конденсаторной батареи. ♦, ■ — то же, что и на рис. 2.

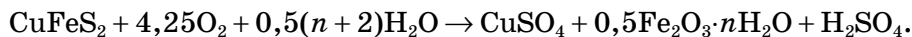
ченной на шаровой мельнице (см. таблицу).

Элементный анализ пробы, обработанной на электроимпульсной

ТАБЛИЦА. Элементный анализ медной руды после механической и электроимпульсной обработок.

Элемент, %	На шаровой мельнице	По электроимпульсной технологии
Медь	0,08	0,4
Фосфор	0,06	0,05
Свинец	0,02	0,08
Титан	0,3	0,2
Цирконий	0,010	0,012
Галлий	0,0012	0,0010
Хром	0,0040	0,0060
Никель	0,00020	0,0030
Бериллий	0,00012	0,00010
Ниобий	0,0006	0,0010
Молибден	0,0004	0,0003
Олово	0,00015	0,00030
Ванадий	0,006	0,0080
Литий	0,002	0,0030
Кадмий	< 0,0005	0,0008
Цинк	0,02	0,120
Кобальт	0,0015	0,0012
Стронций	0,02	0,025

установке, показал, что в техногенном сырье из отходов медной руды, содержание меди увеличилось в 5 раз (с 0,08 до 0,4%). Значительное повышение содержания меди можно объяснить окислительно-восстановительными реакциями, которые происходят во время процесса электро-гидро-импульсного измельчения, но исключены при механической обработке:



Из таблицы видно, что кроме меди, наблюдается значительное увеличение в 6 раз концентрации цинка (с 0,02% до 0,12%), тогда как содержание некоторых остродефицитных элементов (фосфор, титан, бериллий, галлий, молибден, кобальт) после электроимпульсной обработки уменьшилось, но эти изменения лежат в пределах ошибки измерения и могут быть объяснены неоднородностью состава исходного сырья.

4. ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований показана целесообразность и эффективность процесса измельчения и обогащения медной руды с применением электрогидравлического эффекта. Определены условия проведения процесса: оптимальным значением является емкость конденсаторной батареи $0,5 \cdot 10^{-6}$ Ф при частоте импульсов $N = 750$. При этом выход готового продукта, измельченного до $0,2 \cdot 10^{-3}$ м, в исходной руде для Анненского рудника составил 26,7%, а для Нурказганского рудника — 32%.

Электроимпульсная технология обработки позволяет измельчить природную руду до фракций с заданной степенью дисперсности. Кроме того, результаты элементного анализа показывают, что по сравнению с механическими мельницами предлагаемая электроимпульсная технология обработки дает возможность получить из отходов руды обогащенный медью в пять раз продукт.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. О. М. Ивасишин, С. П. Ошкадеров, В. Б. Спиваковский, Г. В. Маковская, Л. С. Галецкий, Л. С. Коган, С. А. Крамаренко, *Международная научно-практическая конференция «Современные экономические возможности развития и реализации сырьевой базы Украины и России в условиях глобализации рынка минерального сырья» (20–23 июня 2005 г., Киев)*, с. 130.
2. В. Б. Спиваковский, Н. В. Новиков, С. П. Ошкадеров, *Пульсационный реактор*, Патент Украины № 59062 (Опубл. 15.08.2003 г.).
3. В. И. Грушко, Г. В. Маковская, В. Б. Спиваковский, С. П. Ошкадеров, В. Н. Уваров, А. П. Шпак, *Способ переработки нефелинполевошпатных*

- пород и отходов их производства*, Патент Украины № 91483 (Опубл. 26.07.2010 г.).
4. В. А. Перов, *Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых* (Москва: Недра: 1990).
 5. А. Ф. Усов, *Известия РАН. Энергетика*, № 1: 54 (2001).
 6. А. А. Юткин, *Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности* (Ленинград: Машиностроение: 1986).
 7. Г. А. Гулый, *Оборудование и технические процессы с использованием электрогидравлического эффекта* (Киев: Наукова думка: 1977).
 8. П. П. Малюшевский, *Основы разрядно-импульсной технологии* (Киев: Наукова думка: 1983).
 9. К. Кусаинов, Б. Р. Нусупбеков, *Разрушение материалов подводным электрическим взрывом* (Караганда: Изд-во ТОО «Издатсервис»: 2010).
 10. Е. В. Кривицкий, *Динамика электровзрыва в жидкости* (Киев: Наукова думка: 1986).
 11. В. R. Nusupbekov, A. K. Khassenov, and A. Zh. Beisebek, *Eurasian Physical Technical Journal*, **9**, No. 2 (18): 34 (2012).
 12. В. R. Nusupbekov and A. K. Khassenov, *European Researcher International Multidisciplinary Journal*, **36**, No. 12-1: 2118 (2012).

REFERENCES

1. O. M. Ivasishin, S. P. Oshkaderov, V. B. Spivakovskiy, G. V. Makovskaya, L. S. Galetskiy, L. S. Kogan, and S. A. Kramarenko, *International Scientific and Practical Conference 'Sovremennye Ekonomicheskie Vozможности Razvitiya i Realizatsii Syr'evoy Bazy Ukrainy i Rossii v Usloviyakh Globalizatsii Rynka Mineral'nogo Syr'ya' (20–23 June, 2005, Kiev)*, p. 130 (in Russian).
2. V. B. Spivakovskiy, N. V. Novikov, and S. P. Oshkaderov, *Pul'satsionnyy Re-aktor*, Patent of Ukraine No. 59062 (Publ. 15.08.2003) (in Russian).
3. V. I. Grushko, G. V. Makovskaya, V. B. Spivakovskiy, S. P. Oshkaderov, V. N. Uvarov, and A. P. Shpak, *Sposob Pererabotki Nefelinpolevoshpatnykh Porod i Otkhodov ikh Proizvodstva*, Patent of Ukraine No. 91483 (Publ. 26.07.2010) (in Russian).
4. V. A. Perov, *Droblenie, Izmel'chenie i Grokhochenie Poleznykh Iskopaemykh* (Moscow: Nedra: 1990) (in Russian).
5. A. F. Usov, *Izvestiya RAN. Energetika*, No. 1: 54 (2001) (in Russian).
6. A. A. Yutkin, *Elektrogidravlicheskiy Effekt i Ego Primenenie v Promyshlennosti* (Leningrad: Mashinostroenie: 1986) (in Russian).
7. G. A. Gulyy, *Oborudovanie i Tekhnicheskie Protsessy s Ispol'zovaniem Elektrogidravlicheskogo Effekta* (Kiev: Naukova Dumka: 1977) (in Russian).
8. P. P. Malyshevskiy, *Osnovy Razryadno-Impul'snoy Tekhnologii* (Kiev: Naukova Dumka: 1983) (in Russian).
9. K. Kusaiynov and B. R. Nusupbekov, *Razrushenie Materialov Podvodnym Elektricheskim Vzryvom* (Karaganda: Izdatelstvo TOO 'Izdatservis': 2010) (in Russian).
10. E. V. Krivitskiy, *Dinamika Elektrovzryva v Zhidkosti* (Kiev: Naukova Dumka: 1986) (in Russian).

11. B. R. Nusupbekov, A. K. Khassenov, and A. Zh. Beisebek, *Eurasian Physical Technical Journal*, **9**, No. 2 (18): 34 (2012).
12. B. R. Nusupbekov and A. K. Khassenov, *European Researcher International Multidisciplinary Journal*, **36**, No. 12-1: 2118 (2012).