

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

О.В. Гальцева, С.В. Бордунов, А.И. Никитина

*При использовании электровзрывной технологии можно совмещать широкий комплекс процессов переработки минерального сырья, но промышленное технологическое оборудование до сих пор не создано. Это объясняется проблемами безопасности при работе с высоким напряжением, вопросами проектирования оборудования с малой материалоемкостью, в котором организован процесс с воздействием на сырье и стенки аппарата ударных волн, сравнимых по амплитуде с ударными волнами при взрыве взрывчатых веществ, эрозией электродов и низкой прочностью материалов для изоляции высоковольтных электродов. Решению проблем разработки промышленного электровзрывного оборудования и испытанию разработанных опытных и опытно – промышленных образцов установки и посвящена настоящая работа.*

*Ключевые слова: электровзрывная технология, минеральное сырье, лабораторный стенд, реактор, обогащение.*

### ВВЕДЕНИЕ

За последние годы опубликовано достаточно большое количество работ по перспективам использования электрического разряда в процессах дробления и измельчения минерального сырья, химической активации компонентов твердой и жидкой фаз, химическому и фазовому превращению компонентов водных суспензий под действием ударных волн генерированных высоковольтными разрядами (ВИР), сравнимых по мощности с ударными волнами от взрывчатых веществ и сопровождающихся ультрафиолетовым излучением, ионизацией воды и вторичной кавитацией [1–7]. Тем не менее, промышленное оборудование непрерывного действия до сих пор не создано

В настоящей работе приведены общие принципы решения основных конструктивных проблем, сдерживающих внедрение в технику электровзрывных установок. К ним относятся прочность, герметичность и материалоемкость корпусов установок с организацией измельчения ударными волнами, использование напряжений 30 кВ и более, низкая стойкость к ударным нагрузкам материалов высоковольтных изоляторов, эрозия высоковольтных электродов с одновременным увеличением межэлектродного промежутка, требующая увеличения разрядного напряжения или регулировки этого промежутка и т.д.

### ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД

Использование электровзрывной технологии для диспергирования и обогащения минерального сырья с последующим анализом химических и фазовых превращений в сырье под действием электрического разряда, инициированию химических реакций вводом в реактор химических реагентов и воздуха было изучено на лабораторном стенде, его схема изображена на рисунке 1 [8–10].

Стенд состоит из пульта управления, включающего автотрансформатор, пускатели и вольтметр, высоковольтного трансформатора мощностью 2 кВт с резистором и выпрямителем, при подаче на вход которого  $\approx 220$  В на выходе можно получать 70 кВ, воздушного разрядника и конденсатора ИК-100-0,25. Рабочее напряжение в эксперименте составляло  $30 \pm 1,5$  кВ. Реактор из нержавеющей и немагнитной стали цилиндрической формы имел коническое днище с углом при вершине  $60^\circ$ , в центр которого был вварен выпускной патрубок для обработанной разрядами суспензии с внутренним диаметром 10 мм. На конце патрубка была нарезана резьба М14 для заглушки в виде накидной гайки с уплотнительной резиновой прокладкой. Фланец реактора, с ввернутыми в него шпильками и приклеенной резиновой уплотнительной прокладкой, он крепился к изолирующей пластине из

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

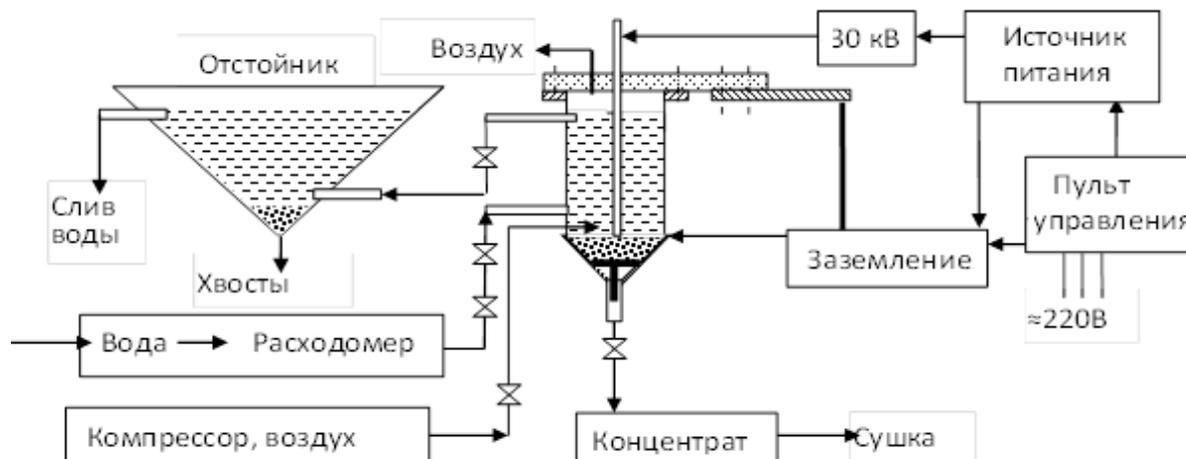


Рисунок 1 – Схема стенда для предварительных технологических исследований по электрогидравлической обработке минерального сырья.

полиметилметакрилата с отверстиями под шпильки. Пластина одновременно являлась крышкой реактора. В изолирующей пластине через демпфер был закреплен высоковольтный электрод с возможностью регулирования величины разрядного промежутка в реакторе между вставкой в нижний выпускной патрубок – заземленный электрод, и концом высоковольтного электрода. Заземленный электрод (вставка) был изготовлен в виде прямого усеченного конуса высотой 6 мм с углом при вершине  $60^\circ$ , совпадающего с конусностью днища реактора. В центре верхней части прямой усеченный конус имел цилиндрическую часть диаметром 9,5 мм и высотой 30 мм для фиксации вставки внутри выпускного патрубка. Геометрические размеры вставки позволяли плотно укладывать ее на дно реактора с фиксацией в выпускном патрубке, обеспечивая хороший электрический контакт и не позволяя частицам проб проваливаться в патрубок. Над конусным днищем реактора были установлены патрубки тангенциального ввода воды и воздуха через распылитель. В верхней части реактора, ниже поверхности изолирующей пластины на 30 мм, был вварен патрубок тангенциального вывода воды с частицами тонкоизмельченной породы так, что рабочий объем реактора, заполняемый суспензией, составлял  $1 \text{ дм}^3$ . Перед экспериментом в донной части реактора устанавливали вставку, крепили реактор к изолирующей пластине, проверяли (периодически) величину межэлектродного расстояния, ввинчивая высоковольтный

электрод через гайку демпфера до упора в заземленный электрод и обратно вывинчивая на необходимую высоту. Рабочее межэлектродное расстояние фиксировали контргайкой на электроде. Двумя вентилями, смонтированными на трубе ввода воды в реактор, устанавливали расход воды, который обеспечивал унос из реактора частиц только определенного размера и плотности; перекрывали подачу воды конечным вентилем, после чего в реактор загружали пробу массой 100 - 200 г, заземляли корпус реактора, зажимали высоковольтный кабель от конденсатора на электроде и включали подачу в реактор воды (и воздуха, если требовали условия эксперимента). По второму варианту подачу воды включали после обработки суспензии разрядами с тем, чтобы восходящим потоком воды выводить из реактора в хвосты только тонкоизмельченные частицы, не оседающие на дно реактора в течение первых 5-10 минут. На пульте управления устанавливали пробивное напряжение и после определенного, заданного условиями эксперимента числа разрядов в реакторе, выключали источник питания.

Для исследования параметров электрического разряда определяли напряжение и величину разрядного тока на разрядном промежутке цифровым запоминающим осциллографом серии ADS1000, версия 1.5.01, включенным в схему через делитель напряжения и коаксиальный шунт. После окончания эксперимента выключали источник питания, снимали

изолирующей штангой напряжение с клемм конденсатора, заземляли клеммы, снимали реактор, вынимали вставку (заземленный электрод), сливали из реактора суспензию концентрата на выпаривание и сушку. Хвосты извлекали из отстойника через нижний патрубок с вентилем после уплотнения осадка в его донной части и декантации осветленной над осадком воды. Отстойник был выполнен в виде круглого прямого конуса с углом при вершине  $60^\circ$ , тангенциальным вводом и выводом воды. Рабочая емкость отстойника составляла  $20 \text{ дм}^3$ , диаметр конуса на уровне сливного патрубка составлял  $540 \text{ мм}$ , что обеспечивало 18-тикратное снижение скорости слива воды из отстойника, по сравнению со скоростью движения воды через реактор снизу вверх. Реактор и отстойник размещались на стенде внутри заземленного ограждения из металлической сетки. При включении пульта управления автоматически включалась блокировка дверей ограждения и световой сигнал «Опасно».

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Порядок проведения эксперимента показан на рисунке 2.

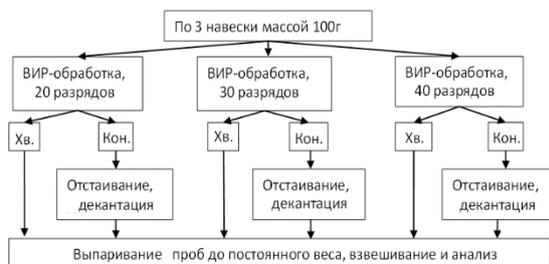


Рисунок 2 – Схема предварительного технологического эксперимента, где исх. – исходный образец до обработки в реакторе, хв. – хвосты, кон. – концентрат.

В случае резкого расхождения результатов в какой-либо серии эксперимента обработке подвергались дополнительные навески до получения разброса данных, не превышающих 25% от среднеарифметического результата. По гранулометрическому составу концентрата и соотношению масс хвостов и концентрата судили о влиянии количества разрядов на степень измельчения сырья.

Предварительная информация о влиянии электровзрывной обработки на рудное и нерудное минеральное сырье, полученная на лабораторном стенде, используется для разработки конструкции макетов, опытных образцов и промышленного электровзрывного оборудования для электровзрывной обработки водных эмульсий и суспензий с крупностью частиц твердой фазы от  $0,63 \text{ мм}$  до  $100 \text{ мм}$ .

## ПРОБОПОДГОТОВКА

Исходное минеральное сырье в состоянии поставки рассыпали на поддон квадратной формы со стороной квадрата  $1 \text{ метр}$  равномерным слоем. Сырье делили на  $25$  квадратов площадью  $4 \text{ дм}^2$  и из  $13$  квадратов (через один по вертикали и горизонтали) отбирали по  $0,2 \text{ дм}^3$  сырья, которое затем объединяли и делили на две неравные части в соотношении  $1:3$ : меньшая часть для гранулометрического (ситового), элементного и фазового анализа, а вторая – для эксперимента в электровзрывном реакторе. Элементный анализ выполняли методом масс – спектрометрии и параллельно «на золото» нейтроноактивационным анализом.

Проба «Б» содержит  $30 - 50\%$  красно-коричневой глины. Влажность пробы близка к  $100\%$ . Проба «Б» взята из хвостохранилища шахты Бериккульская с отходами переработки руды с максимальной крупностью частиц  $3 \text{ мм}$ , в которой золото связано с пиритом и достаточно полно представляет всю массу этого техногенного сырья. Содержание тонкого золота в хвостах шахты по разным данным составляет от  $1$  до  $4 \text{ г/т}$ . Так как шахта «Бериккульская» была заложена в  $1811$  году, поэтому в образце зафиксировано наличие свободной ртути, наиболее широко применявшейся для извлечения золота из руд вплоть до середины прошлого века.

Большое количество мелкой глинистой фракции в пробе не позволило точно определить фракционный состав в пробе «Б» непосредственным рассевом (агломерация тонких фракций и их слипание с крупными частицами). Поэтому фракционный состав этого сырья определяли после отделения глины от остальной части сырья в электровзрывном реакторе, а концентрат после сушки рассеивали на стандартных ситах.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Глинистые компоненты выводили из реактора восходящим потоком воды со скоростью потока  $1 \cdot 10^{-3}$  м/с. Максимальный размер частиц в хвостах составлял 0,045 мм.

переработки следует предусматривать специальные меры для безопасности персонала предприятия. Это относится и ко

Таблица 2 – Фракционный состав концентрата «Б» после удаления глин в электровзрывном реакторе.

Фракция, мм	1,5-2,5	1,1-1,5	0,63-1,1	0,45-0,63	0,315-0,45	0,16-0,315	0,1-0,16	0,07-1-0,1	0,063-0,071	0,045-0,063	<0,045
масс. %	3,88	5,7	6,08	16	14,46	28,6	13,9	7,35	2,82	0,86	0,95

всем старым отвалам.

Среднее содержание удаляемых из проб глин после обработки трех образцов в пробах «Б» составило 50%. Фракционный состав концентрата приведен в таблице 2.

Количество разрядов 10, частота 1 Гц, энергия разряда 112,5 Дж. Результаты масс – спектрального и нейтроноактивационного анализа на наличие микроэлементов, содержание которых превышает 0,1%, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Содержание основных микроэлементов в исходной пробе «Б».

№ п/п	Элемент	Массовая доля, %	Погрешность, %
1	Na	1,06	0,12
2	Mg	1,532	0,077
3	Al	4,99	0,17
4	Si	18,11	0,40
5	P	0,0623	0,0063
6	K	1,36	0,16
7	Ti	0,484	0,073
8	Cr	0,0134	0,0018
9	Mn	0,044	0,010
10	Fe	8,40	0,28
11	As	0,352	0,021
12	Pb	0,154	0,012
13	Au, з/м	1,81	0,46
14	Hg, з/м	4,27	1,43
15	As, з/з	5,4862	0,548

Анализ данных таблицы 3 показывает, что глинистая составляющая хвостов, в основном, вероятно, представлена оксидами Na, K, Al, Si, Mg и Fe. Высокое содержание ртути, вероятно, обусловлено использованием ее в прошлом для извлечения золота амальгамированием. Вместе с тем, в пересчете на суммарную массу хвостов масса свободной ртути может составить 40 - 45 тонн. Такие хвосты представляют серьезную угрозу для окружающей среды и населения. При разработке проекта их промышленной

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов, представленные в таблице 2–3, показывают, что при скорости восходящего потока воды, соответствующей «не уносу» вместе с глинами в хвосты частиц золота с размером более 10 мкм, потери золота с хвостами не превысят 4,667 масс.%. Кроме того, конструкция реактора не исключала вероятность выброса ударными волнами в патрубков вывода хвостов частиц золота крупнее 10 мкм. Эта вероятность пропорциональна доле частиц крупностью более 190 мкм в хвостах, т.е. 2 – 4%. Следовательно, в промышленном электровзрывном реакторе с устоявшимися потоками исходного твердого сырья и восходящей воды в большом объеме реактора потери золота могут быть меньше. После электровзрывной обработки сырья «Б» в концентрат перейдет не более 50 от исходной массы, потери золота с хвостами не превысят 5%, а выход золота в концентрат составит не менее 95%. Из исходной тонны сырья с содержанием золота 1,81 г/т при условии потерь золота с крупностью частиц менее 10 мкм в концентрат перейдет 1,7191 г золота.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буркин В.В. Волновая динамика электровзрыва в твердых диэлектриках/ В.В. Буркин, Н.С. Кузнецова, В.В. Лопатин// Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. – Вып. 5. – С. 42-48.
2. Бордунов С.В. Электровзрывная технология активации известкового молока/ С.В. Бордунов, В.А. Макеев, И.Т. Шепелев. //Цветные металлы. – 2008. – № 2. – С. 65–68.
3. Карбина Ю.С. Процесс фоторегистрации в производственном цикле радиоэлектронной техники/ Ю.С. Карбина, И.В. Плотникова, О.В.

Гальцева, Е.Ю. Елисеева// Ползуновский вестник. – 2016. – № 2. – С. 139–143.

4. Подлегаева Л.Н., Звиденцова Н.С., Колесников Л.В. Исследование условий получения наночастиц серебра и золота при химическом осаждении/ Л.Н. Подлегаева, Н.С. Звиденцова, Л.В. Колесников// Ползуновский вестник. – 2008.– № 3. – С. 96–98

5. Rogovyyh A.V. Inspection methods of load-recording device 'GAMMA–500'/ A.V. Rogovyyh, N.M. Natalinova, A.S. Spiridonova, A.S. Gordynets// 2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015 – Proceedings". – 2015. – с. 7147190.

6. Goldshtein A.E. An electro-capacitive measuring transducer for the process inspection of the cable capacitance per unit length in the process of production// A.E. Goldshtein, G.V. Vavilova, V.Y. Belyankov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2015. – Т. 51. – № 2. – С. 86-93.

7. Кузнецов П.А. Аддитивные технологии на базе металлических порошковых материалов для российской промышленности/ П.А. Кузнецов, О.В. Васильева, А.И. Теленков, В.И. Савин, В.В. Бобырь// Новости материаловедения, Наука и техника. – 2015. – № 2. – С. 4–10.

8. Bordunov S.V. About Prospects of Enrichment of Mineral Raw Materials and Chemical Activation of Water Suspensions by Electroexplosive Method/ S.V. Bordunov, O.V. Galtseva// Journal of Physics: Conference Series Ser. "Innovations in Non-

Destructive Testing". – 2016. – С. 012009. – doi: 10.1088/1742-6596/671/1/012009.

9. Пат. № 2470875 РФ МПК C02F 1/34, C02F 1/48, B01J 19/08, B02C 23/36 Установка для электровзрывной активации водных пульп и суспензий/ Бордунов С.В., Бордунов В.В., Кулага И.Г.; заявл. 22.06.2011; опубл. 27.12.2012.

10. Гальцева О.В., Бордунов С.В., Кулага И.Г. Электровзрывное оборудование для диспергирования, химической активации и обогащения минерального сырья/ О.В. Гальцева, С.В. Бордунов, И.Г. Кулага И.Г. – Томск: Изд-во Том. политехн-го ун-та, 2013. – 184 с.

**Гальцева Ольга Валерьевна** – к.т.н., доцент кафедры Физических методов и приборов контроля качества Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск, e-mail: [rabota2013tpt@mail.ru](mailto:rabota2013tpt@mail.ru)

**Бордунов Сергей Владимирович** – к.т.н., директор ООО НВП «Эчтех», г. Томск, e-mail: [zdorovo5@mail.ru](mailto:zdorovo5@mail.ru)

**Никитина Анастасия Ильинична** – магистрант Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск, e-mail: [zdorovo5@mail.ru](mailto:zdorovo5@mail.ru)