

**Афанасьев Анатолий Ильич**, доктор техн. наук, профессор, **Потапов Валентин Яковлевич**, доктор техн. наук, профессор, **Стожков Дмитрий Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, **Потапов Владимир Валентинович**, канд. техн. наук, доцент, **Чиркова Алёна Анатольевна**, канд. техн. наук, доцент

Уральский государственный горный университет, 620144, Россия, г. Екатеринбург,  
ул. Куйбышева, 30

E-mail: gmf.tm@ursmu.ru

## ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЗАБАЛАНСОВЫХ МЕДНО-ЦИНКОВЫХ РУД

### *Аннотация.*

*В последнее время в эксплуатацию вводятся месторождения с относительно низким содержанием полезных компонентов. В связи с этим возрастает необходимость предварительного разделения горной массы, так как оно позволит вывести на первых этапах большую массу пустой породы. Используемые операции дробления в процессе переработки руд наиболее дорогие и энергоёмкие, поэтому эффективно выделять обеднённую фракцию руды в дробильно-сортировочном комплексе в крупнокусковом виде. Эффективное разупрочнение сульфидных руд может осуществляться тепловым (электрическим) и химическим пробоем. Параметры теплового пробоя (напряжение и ток) существенно зависят от содержания в горной породе токопроводящих включений - сульфидов. При пропускании тока через кусок зерна сульфидов расширяются и отделяются от пустой породы, а в некоторых случаях, когда сульфиды образуют прослойку, происходит разрыв куска. Поэтому в качестве идентификатора куска, содержащего сульфиды с определенной концентрацией, был принят электрический пробой. Эффективность теплового воздействия на куски определялась по степени и удельной энергоёмкости дробления. В статье рассматривается технология разделения сульфидосодержащей руды с низким содержанием металлов после воздействия разрядно - импульсного разрушения. Показана взаимосвязь между напряжением электрического пробоя и содержания сульфидов в медно-цинковой руде. Представлены результаты проведенных экспериментов по оценке расхода удельного энергии при воздействии электроимпульса на куски бедной руды в зависимости от ценного компонента. Обоснован признак для разделения руды и составлена имитационная модель процесса. Определены общие энергозатраты на технологические процессы разрядно - импульсного разделения бедных сульфидных руд. Установлено, что степень дробления электрообработанной руды в 1,25 раза больше, чем не пробитой. Удельная энергия разрушения электрообработанной руды была меньше в 1,33 раза. Сокращение объемов горной массы и уменьшение относительной энергии разрушения приведёт к соответствующему уменьшению производительных затрат энергии на последующие операции подготовки руды к разделению.*



### **Информация о статье**

Поступила:

13 ноября 2021 г.

Рецензирование:

30 ноября 2021 г.

Принята к печати:

03 декабря 2021 г.

### **Ключевые слова:**

*бедные медно-цинковые руды, напряжения пробоя, гранулометрический состав сырья, степень дробления, выход мелких фракций, удельная энергия дробления.*

**Для цитирования:** Афанасьев А.И., Потапов В.Я., Стожков Д.С., Потапов В.В., Чиркова А.А. Электроимпульсное разрушение забалансовых медно-цинковых руд // Горное оборудование и электромеханика – 2021. – № 6 (158). – С. 32-37 – DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-32-37

### **Актуальность**

Переработка забалансовых сульфидных руд приводит к существенному уменьшению степени дробления, увеличению объемов дробления горной массы, не содержащей полезного ископаемого (пустой породы) и, соответственно, росту материальных и энергетических затрат. Дробилки, являющиеся основным технологическим оборудованием для

подготовки горных пород к последующему измельчению, требуют при работе значительных затрат энергии. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий, использующих дробильно-размольное оборудование, возможно путем создания новых конструкций сепараторов для предварительного разделения, которые позволят су-

щественно сократить объем перерабатываемой горной массы. Электроимпульсных сепараторов, использующих тепловой пробой, для разделения бедной сульфидной руды в настоящее время нет. Тепловой пробой сопровождается изменением прочностных характеристик кусков руды что, соответственно, в дальнейшем приводит к снижению общих энергозатрат на разрушение и расширяет область применения различных породоразрушающих машин и механизмов. С ростом стоимости энергопотребления, исследования, в области создания аппаратов, позволяющих снизить энергозатраты на разрушение забалансовых руд после разделения их на электроимпульсном сепараторе, является актуальными.

**Объект исследования:** процесс дробления ударом сульфидных руд после разделения на электроимпульсном сепараторе.

**Задача исследования:** повышение эффективности работы оборудования для предварительного разделения забалансовых сульфидных руд.

**Методы исследований.** Математическое и физическое моделирование, математическая обработка результатов эксперимента.

**Методология.** Общелогические методы (анализ и обобщение научно-технической и патентной информации, индукция, синтез и т. д.), теория подобия, методы математического и физического моделирования, математическая статистика при проведении экспериментальных исследований на опытных образцах предлагаемых аппаратов.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Переработка забалансовых руд, в связи с отработкой богатых месторождений, является актуальной задачей. Решение этой задачи связано с относительно большими энергетическими затратами, что накладывает существенные ограничения при выборе способа предварительного разделения некондиционных руд. Эти руды содержат большое количество практически полностью пустой породы. Её необходимо удалить в хвосты, что значительно сократит объем перерабатываемой горной массы и, соответственно, общие энергетические затраты.

Проблемами ресурса и энергосбережения занимались ряд ученых. Чл.-корр. АН СССР В.И. Ревнивцев и академик Чантурия В.А [1]. В 70-ых годах прошлого века они предложили снижать энергоёмкость процессов дробления, за счет разработки устройств воздействия на горную породу с целью уменьшения ее прочности. Эти воздействия увеличивают степень раскрытия зерен полезных минералов, а процессы дробления и измельчения заменяются на процессы избирательного разрушения по границам вкраплений полезного компонента. Наиболее эффективным является процесс разрушения за счет развития на границах вкраплений растягивающих напряжений. Такими воздействиями являются: тепловое воздействие (электрический пробой руды), обработка высокочастотным электромагнитным полем, магнитно-импульсная обработка [2-7].

Наши исследования показали, что электрический пробой руды наиболее эффективен при обработке забалансовых медно-цинковых руд [8, 9].

В УГГУ была разработана и изготовлена экспериментальная установка. Она состояла из вибрационного питателя, трансформатора с выходным напряжением от 0,4 до 9,2 кВ и системы управления им, отбрасывателя пустой породы, индукционного ударного механизма для разрушения сульфидной руды. Для испытаний была выбрана некондиционная руда Молодежного месторождения с массовыми долями: халькопирита - 1,4...2,5 %; теннангита - 0,1...0,2 %; сфалерита - 0,7...1,7 %; пирита - 22,8...34,2 %; пустой породы 61,4...75%. Богатая медно-цинковая руда содержит такие же компоненты, но с другими массовыми долями. Сульфидов в богатой руде этого месторождения содержится до 87 % [8].

Для проведения исследований по определению качественного и количественного влияния электрического пробоя на дробимость забалансовой сульфидной руды были отобраны несколько различных по гранулометрическому составу проб.

В первом эксперименте из всей пробы были отобраны 57 кусков крупностью +20–80 мм. Затем куски укладывали на изолятор между электродами, на которые подавали напряжение до 9,2 кВ.

В результате эксперимента оказалось, что электрический пробой приводит в некоторых случаях к разрушению кусков. На рис. 1 показаны куски сульфидной руды после пропускания через них тока. Такие разрушения кусков систематически наблюдались при наличии в куске прослойки сульфидов [9].

На рисунке 1 отчетливо виден след от электрической дуги - оплавленное пятно. Разрушение кусков на две части произошло по сульфидной прослойке толщиной не более 0,5 мм [9].

В следующей серии испытаний была исследована энергоёмкость процесса ударного разрушения забалансовой руды. Для этого была отобрана проба крупностью –80+20 мм общей массой до 11,8 кг. Целью этой серии экспериментов являлось выявление взаимосвязи энергии удара и размеров кусков исходной руды, а также взаимосвязи затрат энергии на разрушение со степенью дробления.

В результате статистической обработки установлено, размер кусков исходной пробы забалансовой руды являются случайной величиной, а распределение кусков руды в классе –80+20 мм можно описать законом Вейбулла с параметрами  $a = 1,74$ ,  $b = 3,2$ . Степень соответствия данного распределения закону Вейбулла производилась по критерию  $\chi^2$ . С надежностью 0,95 это распределение соответствует данному закону [10-11].

В таблице 1 приведены гранулометрические составы проб бедной сульфидной руды до и после дробления.

На рис. 2 и 3 приведены гистограммы распределения размеров кусков электропробитой и непробитой руды до и после дробления.

Из таблицы 1 и рисунка 2 видно, что исходный состав руды имеет практически одинаковый средневзвешенный диаметр куска. После термообработки

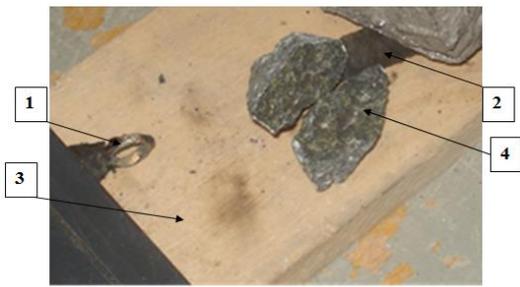
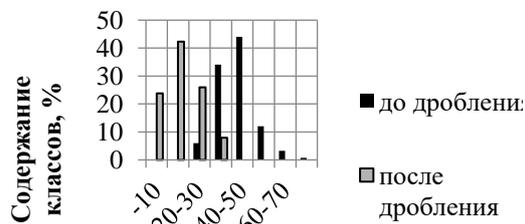


Рис. 1. Образцы кусков сульфидной руды после электроимпульсной обработки:

1,2 – электроды, 3- изолятор; 4 – разрушенный кусок руды.

Fig. 1. Samples of lumps of sulphide ore after electric pulse treatment:

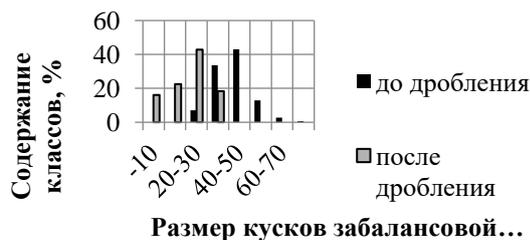
1,2 - electrodes, 3-insulator; 4 - destroyed piece of ore.



#### Размер кусков забалансовой руды

Рис. 2. Гистограмма распределения кусков электропробитой сульфидной руды до и после дробления ударом

Fig. 2. Histogram of the distribution of pieces of electrically processed sulfide ore before and after crushing by impact



#### Размер кусков забалансовой...

Рис. 3. Гистограмма распределения кусков непробитой руды сульфидной руды до и после дробления ударом

Fig. 3. Histogram of the distribution of lumps of untreated sulphide ore before and after crushing by impact

и дробления ударом средневзвешенный диаметр пробитой руды составил 16,8 мм, а не пробитой - 21,4 мм, т.е. уменьшился на 11%.

Следует отметить, что после электрообработки исходная проба разделилась на две части: непробитая руда (пустая порода) – 6,6 кг; пробитая руда – 5,2 кг.

Размеры кусков забалансовой руды после дробления также являются случайной величиной, а распределение их размеров в классе –40 мм можно описать законом Рэля с параметрами  $a = 13,4$ . Степень соответствия данного распределения закону Рэля производилась по критерию  $\chi^2$ . С надежностью 0,95 это распределение соответствует данному закону.

Из рис. 2 видно, что существенную часть продукта (66%) составляет класс –20мм, которого не было в исходной пробе. При этом содержание крупных классов (+40мм) стало равным нулю.

В таблице 2 приведены средневзвешенные размеры кусков руды и энергии единичного удара ( $E_y$ ) в процессе её разрушения. Степень дробления ( $i$ ) определялась по известной формуле ( $i=d_1/d_2; d_1$  и  $d_2$  – соответственно средневзвешенный размер куска до и после дробления, мм.) [12].

В каждой строке эксперимента проводилось не меньше 5 опытов. Их количество определялось в зависимости от степени вариации полученных результатов.

Удельная энергия разрушения сульфидов определялась по формуле:

$$E_{yp} = E_y / m \quad (1)$$

где  $m$  – масса куска руды, кг.

На рис. 4 приведена зависимость удельной энергии разрушения от энергии удара.

После статистической обработки результатов [16] эксперимента получено уравнение регрессии, связывающее удельную энергию разрушения ( $E_{op}$ ) с энергией единичного удара ( $E_y$ ):

$$E_{op} = -2E - 07E_y^3 + 0,0002E_y^2 - 0,046E_y + 4,4 \quad (2)$$

Корреляционное отношение равно  $R^2 = 0,98$  [9,10]. Относительно большая величина корреляционного отношения свидетельствует о наличии взаимосвязи энергии единичного удара и относительной энергии разрушения. Регрессионное уравнение адекватно отражает реальный процесс ударного разрушения электрообработанной бедной сульфидной руды при изменении энергии удара от 50 до 200 Дж.

На рис. 5 приведен график зависимости энергии удара от средневзвешенного диаметра куска электрообработанной руды.

Уравнение регрессии [16] имеет вид:

$$E_y = 3,6d - 39,2, \quad (3)$$

где  $d$  – средневзвешенный диаметр куска сульфидной руды, мм.

Корреляционное отношение, равное  $R^2 = 0,975$  [10,11], свидетельствует о наличии взаимосвязи энергии единичного удара и средневзвешенного диаметра куска. Регрессионное уравнение адекватно при изменении крупности кусков от 28 до 80 мм.

Уравнение 3 позволяет при разработке аппаратов для сортировки бедных руд определить параметр ударного механизма – энергию единичного воздействия для различной крупности исходного сырья.

При дроблении руды замерялась суммарная энергия удара. Установлено, что степень дробления электрообработанной руды увеличилась в 1,25 раза, а удельная энергия разрушения электрообработанной руды уменьшилась в 1,33 раза. Это можно объяснить тем, что при электрическом пробое куска за счет увеличения объемов сульфидных вкраплений появляются внутренние трещины, т.е. происходит вскрытие зерен сульфидов. При этом уменьшается прочность кусков, которая и проявляется при удар-

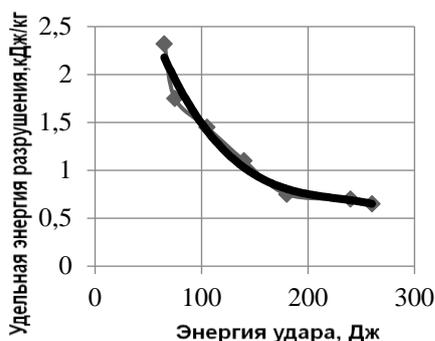


Рис. 4. Зависимость удельной энергии разрушения от энергии удара

Fig. 4. Dependence of the specific energy of destruction on the impact energy

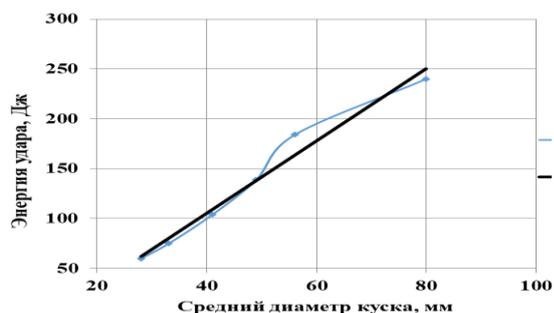


Рис. 5. Зависимость энергии удара от средне-взвешенного диаметра куска

Fig. 5. Dependence of the impact energy on the weighted average diameter of the piece

ном разрушении в виде увеличения степени дробления. В дальнейшем вскрытие зерен сульфидов при измельчении позволит увеличить их выход и уменьшить потери в хвостах.

Результаты, приведенные в таблице 1, показывают, что электрообработка увеличивает содержание класса крупностью -10 мм на 7,6 % и уменьшает выход крупного класса + 20 мм на 27,3 %. Ранее проведенные исследования показали, что основная часть сульфидов находится в кусках мелких классов. Поэтому увеличение выхода мелких классов после дробления свидетельствует о повышении степени вскрытия сульфидных зерен. В результате экспериментов было установлено, что куски горной породы, не пробиваемые током, практически не содержат сульфидов. Их количество составило 56% от общей массы пробы. При переработке бедной руды эти куски могут быть отброшены в хвосты. Сокращение объемов горной массы в 2,38 раза и уменьшение относительной энергии разрушения в 1,33 раза приве-

дет к соответствующему уменьшению непроизводительных затрат энергии на дробление. Кроме того, удаление в хвосты пустой породы, повышает в целом содержание сульфидов, что позволяет эти руды перевести в разряд кондиционных.

#### Выводы

1. Определена взаимосвязь энергоемкости ударного разрушения после теплового пробоя забалансовых руд, грансостава и величины энергии единичного удара, что позволяет определить основные параметры ударного механизма.

2. Сортировка бедной сульфидной руды на электроимпульсном сепараторе приводит к сокращению объемов перерабатываемой рудной массы в 2,38 раза и последующему снижению непроизводительных затрат энергии в 1,3 раза на объем подготовительных операций и технологического цикла в целом.

3. Электроимпульсная сепарация увеличивает эффект разрушения и соответственно выход мелких классов (-10мм на 7,6%), за счет образующейся зоны ослабления горной массы на границе двух фаз (порода и полезный компонент) вкрапленных сульфидных руд, что в технологии последующего глубоко разделения позволит повысить извлечение металлов в концентраты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чантурия В.В. Прогрессивные технологии комплексной и глубокой переработки природного и техногенного минерального сырья // Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья: сб. науч. ст. Томск, 2014. - С. 5 – 6.
2. Duan, C.L.; Diao, Z.J.; Zhao, Y.M.; Huang, W. Liberation of valuable materials in waste printed circuit boards by high-voltage electrical pulses. *Miner. Eng.* 2015, 70, pp.170–177.
3. Cho, S.H.; Cheong, S.S.; Yokota, M.; Kaneko, K. The dynamic fracture process in rocks under high-voltage pulse fragmentation. *Rock Mech. Rock Eng.* 2016, 49, pp. 3841–3853.
4. Peng Gao, Shuai Yuan, Yuexin Han, Yanjun Li and Hongyun Chen. Experimental Study on the Effect of Pretreatment with High-Voltage Electrical Pulses on Mineral Liberation and Separation of Magnetite Ore. *Minerals* 2017, 7(9), pp. 153.
5. Mitsuhiro Shigeishi. Separation and Collection of Coarse Aggregate from Waste Concrete by Electric Pulsed Power. *AIP Conference Proceedings*. vol.1887, 020077, 2017, pp. 1 – 10.
6. Филатов Г.П., Курец В.И., Юшков А.Ю. Электроимпульсное разрушение многоэлементных композитных изделий // Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья: сб. науч. ст. Томск, 2013. - С. 513-514.
7. Курец В.И., Лобанова Г.Л., Юшков А.Ю. Физико-химические процессы при электроимпульсном разрушении полиминеральных сред // Прогрессивные методы обогащения и комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья: сб. науч. ст. - Томск 2014. С. 132-135.
8. Афанасьев А.И., Стожков Д.С., Потапов В.Я., Потапов В.В. Энергоемкость ударного разрушения бедных медно-цинковых руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. - 2017. - № 10. - С. 25-30.

Таблица 1. Грансостав дробленой медно-цинковой руды до и после процесса электропробоя  
 Table 1. Granular composition of crushed copper-zinc ore before and after the process electrical impulse destruction

Класс, мм	Содержание класса до дробления, %		Содержание класса после дробления, %		Содержание класса до дробления, %		Содержание класса после дробления, %	
	Электропробитая руда				Не пробитая руда			
		Средневзвешенный диаметр, мм		Средневзвешенный диаметр, мм		Средневзвешенный диаметр, мм		Средневзвешенный диаметр, мм
-10	0	0	23,8	1,2	0	0	16,2	0,9
+10-20	0	0	42,3	6,3	0	0	22,6	3,4
+20-30	6,0	1,5	26,0	6,5	7,0	1,4	42,9	10,7
+30-40	34,1	11,9	7,9	2,8	33,6	11,8	18,3	6,4
+40-50	44,0	19,8	0	0	43,0	19,4	0	0
+50-60	12,0	6,6	0	0	13,0	7,1	0	0
+60-70	3,2	2,1	0	0	2,7	1,7	0	0
+70-80	0,7	0,5	0	0	0,7	0,5	0	0
Сумма	100	42,4	100	16,8	100	41,9	100	21,4

Таблица 2. Результаты процесса разрушения забалансовой медно-цинковой электропробитой руды  
 Table 2. Results of the process of destruction of off-balance copper-zinc ore after electrical treatment

№	Средневзвешенный размер кусков до дробления, $d_1$ , мм	Степень дробления, $i$	Энергия удара, $E_y$ , Дж	Удельная энергия разрушения, $E_{ур}$ , кДж/кг
1	28	2,16	60	2,33
2	33	3,75	75	1,67
3	41	3,6	104	1,40
4	49	3,8	139	1,10
5	56	3,1	184	0,775
6	80	1,87	240	0,7
7	90	1,6	260	0,65

9. Афанасьев А. И., Паньков С. А., Потапов В. Я., Сисисин Д.И. Угольников А. В. Разделение бедных сульфидных руд методом электрического пробоя // Известия Уральского гос. горного университета № 4 (40), 2015. С. 58-61.

10. Методы и средства научных исследований. Методы планирования и обработки результатов экспериментов: учебное пособие для студентов, обучающихся по направлениям 35.03.02 и 35.04.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств», профиль «Технология деревообработки» / А.Н. Чубинский, Д.С. Русаков, И.М. Батырева, Г.С. Варанкина – СПб.: СПбГЛТУ, 2018. - 109 с.

11. Блехман И.И., Мышкис А.Д., Пановко Я.Г. Прикладная математика: Предмет, логика, особенности подходов. С примерами из механики. Изд. 5, испр. URSS. 2018. 376 с.

12. Подготовительные процессы при обогащении полезных ископаемых. Дробление, измельчение, грохочение и классификация. [учебное пособие] / А.Н. Корчевский, Е.И. Назимко, Л.И. Серафимова, В.Г. Науменко В.Г - Донецк:, 2017. – 180 с.

DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-32-37

**Anatoliy I. Afanasyev**, Dr.Sc. in Engineering, professor, **Valentin Ya. Potapov**, Dr.Sc. in Engineering, professor, **Dmitriy S. Stozhkov**, C.Sc. in Engineering, Associate Professor, **Vladimir V. Potapov**, C.Sc. in Engineering, Associate Professor, **Alena A. Chirkova**, C.Sc. in Engineering, Associate Professor

Ural State Mining University, 620144, Russia, Yekaterinburg, st. Kuibyshev, 30

E-mail: gmf.tm@ursmu.ru

**ELECTRIC PULSE DESTRUCTION OF BALANCED COPPER-ZINC ORE**



#### Article info

Received:

13 November 2021

Revised:

30 November 2021

Accepted:

03 December 2021

**Keywords:** *poor copper-zinc ores, breakdown voltages, energy intensity of electrical separation, degree of crushing, yield of fine fractions, specific energy of destruction.*

#### Abstract.

Recently, the natural content of useful components in the original ore has been decreasing, and therefore the urgency of the problem of preliminary separation of the rock mass increases, since it will allow removing a large mass of waste rock at the first stages. The crushing operations used in the ore processing process are the most expensive and energy-intensive; therefore, it is efficient to separate the depleted ore fraction in the crushing and screening complex in lumpy form. Effective softening of sulfide ores can be carried out by thermal, electrical and chemical breakdown. The parameters of thermal breakdown (voltage and current) significantly depend on the content of conductive inclusions in the rock. When a current is passed through a piece, the sulfide grains expand and separate from the gangue, and in some cases, when the sulfides form an interlayer, the piece breaks. Therefore, thermal (electrical) breakdown was taken as an identifier for a lump containing sulfides with a certain concentration. The effectiveness of the thermal effect on the pieces was determined by the degree and energy consumption of crushing. The article discusses the technology of separation of sulfide-containing ore with a low metal content after exposure to discharge - pulse destruction. The relationship between the electric breakdown voltage and the sulfide content in copper-zinc ore is shown. The results of the experiments carried out to assess the consumption of specific energy when exposed to an electric pulse on pieces of lean ore, depending on the valuable component. An attribute for ore separation has been substantiated and a simulation model of the process has been compiled. The total energy consumption for technological processes of discharge-pulse separation of poor sulfide ores has been determined. It was found that the degree of crushing of the electrically treated ore was 3.75, and that of the non-processed ore - 2.94. The specific energy of destruction of the electrically treated ore was 1.67 kJ/kg, and that of the untreated ore - 2.21 kJ/kg, i.e. more 1.33 times. A reduction in the volume of rock mass and a decrease in the relative energy of destruction will lead to a corresponding decrease in the unproductive energy consumption for crushing.

**For citation** Afanasyev A.I., Potapov V.Ya., Stozhkov D.S., Potapov V.V., Chirkova A.A. Electric pulse destruction of balanced copper-zinc ore. Mining Equipment and Electromechanics, 2021, no.6 (158), pp. 32-37. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-6-32-37

#### REFERENCES

1. Chanturia V.V. Progressivnyye tekhnologii kompleksnoy i glubokoy pererabotki prirodnogo i tekhnogenogo mineral'nogo syr'ya [Progressive technologies of complex and deep processing of natural and technogenic mineral raw materials], Progressive methods of enrichment and complex processing of natural and technogenic mineral raw materials: collection of scientific articles Tomsk. 2014, pp. 5–6. [In Russ].
2. Duan, C.L.; Diao, Z.J.; Zhao, Y.M.; Huang, W. Liberation of valuable materials in waste printed circuit boards by high-voltage electrical pulses. Miner. Eng. 2015, 70, pp.170–177.
3. Cho, S.H.; Cheong, S.S.; Yokota, M.; Kaneko, K. The dynamic fracture process in rocks under high-voltage pulse fragmentation. Rock Mech. Rock Eng. 2016, 49, pp. 3841–3853.
4. Peng Gao, Shuai Yuan, Yuexin Han, Yanjun Li and Hongyun Chen. Experimental Study on the Effect of Pretreatment with High-Voltage Electrical Pulses on Mineral Liberation and Separation of Magnetite Ore. Minerals 2017, 7(9), pp. 153.
5. Mitsuhiro Shigeishi. Separation and Collection of Coarse Aggregate from Waste Concrete by Electric Pulsed Power. AIP Conference Proceedings. vol.1887, 020077, 2017 pp. 1 – 10.
6. Filatov G.P., Kurets V.I., Yushkov A.Yu. Electro-pulse destruction of multi-element composite products // Innovative processes of complex and deep processing of mineral raw materials: collection of scientific articles Tomsk. 2013, pp. 513–514.
7. Afanasyev A.I., Stozhkov D.S., Potapov V.Ya., Potapov V.V. Energy intensity of impact destruction of poor copper-

zinc ores. Gornyi informatsionno-analiticheski ibyulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal), 2017, No 10, pp. 25-30. [In Russ].

9. Afanasyev A. I., Pankov S. A., Potapov V. Ya., Simis-inov D. I. Ugolnikov A.V. Separation of poor sulfide ores by electric breakdown method. Izvestiya Ural'skogo gos. Gornogo universiteta, No 4 (40), 2015. pp. 58-61. [In Russ].

10. Chubinsky A.N., Rusakov D.S., Batyrev I. M., Varankina G.S. Metody i sredstva nauchnykh issledovaniy. Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov eksperimentov: uchebnoye posobiye dlya studentov, obuchayushchikhsya po napravleniyam 35.03.02 i 35.04.02 «Tekhnologiya lesozagotovitel'nykh i derevoprerabatyvayushchikh proizvodstv», profil' «Tekhnologiya derevoobrabotki» [Methods and means of scientific research. Methods of planning and processing the results of experiments: a textbook for students enrolled in directions 35.03.02 and 35.04.02 «Technology of logging and wood processing industries», profile «Technology of woodworking»], SPb, SPbGLTU, 2018, 109 p. [In Russ].

11. Blekhman I.I., Myshkis A.D., Panovko Ya.G. Prikladnaya matematika: Predmet, logika, osobennosti podkhodov. S primerami iz mekhaniki Izd. 5, ispr [Applied Mathematics: Subject, logic, peculiarities of approaches. With examples from mechanics Ed. 5, rev], URSS, 2018, 376 p. [In Russ].

12. Korchevsky A.N., Nazimko E.I., Serafimova L.I., Naumenko V.G V.G.. Podgotovitel'nyye protsessy pri obogashchenii poleznykh iskopayemykh. Drobleniye, izmel'cheniye, grokhocheniye i klassifikatsiya (uchebnoye posobiye) [Preparatory processes for mineral processing. Crushing, crushing, screening and classification (tutorial)], Donetsk, 2017, 180 p. [In Russ].