

Научная статья
УДК 622.236.73
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.010

К ВОПРОСУ ОБ УДЕЛЬНЫХ ЭНЕРГОЗАТРАТАХ НА РАЗРУШЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ЕСТЕСТВЕННОГО И ИСКУССТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Андрей Александрович Климов¹, Василий Николаевич Селиванов²

^{1,2}Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра
Российской академии наук, Апатиты, Россия

¹a.klimov@ksc.ru

²v.selivanov@ksc.ru

Аннотация

Рассматриваются зависимости удельных затрат энергии на разрушение различных материалов естественного и искусственного происхождения от крупности конечного продукта. Также в общем виде представлено аналитическое выражение для описания характеристик энергозатрат, аналогичное моделям, применяемым при оценке разрушаемости горных пород механическими методами.

Ключевые слова:

электроимпульсный и электрогидроимпульсный методы, энергозатраты, дезинтеграция, руды, шлаки, карбид кремния

Благодарности:

работа выполнена в рамках государственного задания Центра физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра Российской академии наук (FMEZ-2022-0014).

Для цитирования:

Климов А. А., Селиванов В. Н. К вопросу об удельных энергозатратах на разрушение материалов естественного и искусственного происхождения электрофизическими методами // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 6. С. 84–92. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.010.

Original article

TO THE QUESTION OF SPECIFIC ENERGY CONSUMPTION FOR THE FRACTURE OF MATERIALS OF NATURAL AND ARTIFICIAL ORIGIN BY ELECTROPHYSICAL METHODS

Andrey A. Klimov¹, Vasilii N. Selivanov²

^{1,2}Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences,
Apatity, Russia

¹a.klimov@ksc.ru

²v.selivanov@ksc.ru

Abstract

The article considers the dependences of specific energy consumption for fracture of various materials of natural and artificial origin on the coarseness of the final product. It also presents, in general terms, an analytical expression to describe the characteristics of energy consumption, similar to the models used in assessing the fractability of rocks by mechanical methods.

Keywords:

electrodynamic method, electrohydraulic method, energy consumption, disintegration, ores, slag, silicon carbide

Acknowledgements:

This work was carried out within the framework of the State Research Program of the Northern Energetics Research Centre of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences (FMEZ-2022-0014).

For citation:

Klimov A. A., Selivanov V. N. To the question of specific energy consumption for the fracture of materials of natural and artificial origin by electrophysical methods // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 6. P. 84–92. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.6.010.

Введение

В последние десятилетия развитие электрофизических технологий позволило создать и апробировать в различных промышленных процессах новые методы обработки, рециклинга

и разрушения материалов. Проводятся обширные исследования по увеличению эффективности дробления и измельчения горных пород и руд, обогащения хвостов добычи ископаемых и доизвлечения полезных компонентов из шлаков металлургических производств, работы по улучшению качества и степени разделения компонентов техногенного сырья при его переработке.

Электрофизические (электроразрядные) методы разрушения по характеру воздействия принято разделять на электроимпульсный и электрогидроимпульсный — в зависимости от того, разрушается ли материал непосредственно электрическим разрядом и отражёнными волнами или же опосредованно с помощью ударных волн давления от пробоя среды, в которую помещён материал. В качестве альтернативы механическим методам дробления, электрофизические методы могут предложить следующие преимущества: независимость эффективности разрушения от показателей твёрдости материала; разделение различных по диэлектрической проницаемости фаз, входящих в структуру материалов; выделение из структуры разрушаемого вещества проводящих включений; малый износ измельчающего инструмента; возможность регулирования гранулометрического состава продукта за счёт изменения амплитуды воздействующего напряжения. Однако у данных технологий присутствуют и недостатки: изменение химического состава поверхности продуктов дробления при воздействии на материалы с низкой температурой плавления; необходимость в жидкой среде с низкой проводимостью для осуществления импульсного пробоя материала; снижение эффективности воздействия при уменьшении характерных размеров образцов для разрушения; низкая или практически нулевая эффективность фрагментации минералов и руд с малым удельным сопротивлением.

Основные цели исследований электроразрядного разрушения горных пород и руд последних лет — это определение факторов, влияющих на гранулометрический состав получаемого продукта и эффективность выделения отдельных компонентов [1, 2]. Также проводятся эксперименты по осуществлению предварительного электроимпульсного разупрочнения рудных пород для снижения затрат энергии на последующей стадии механического дробления [3]. В отношении электроимпульсного воздействия на металлосодержащие шлаки и техногенное сырьё главной задачей выступает достижение наибольшей избирательности разрушения и степени разделения составляющих фаз [4].

Поскольку исследователи в большей степени ориентируются только на преимущества электроразрядного разрушения по сравнению с механическим дроблением, то достаточно малая часть научных работ в этой области освещает удельные энергозатраты на процесс фрагментации различных материалов. По этой причине в Центре энергетики Севера КНЦ РАН были проведены исследования по электроимпульсному и электрогидроимпульсному разрушению различных искусственных материалов и горных пород, направленные на рассмотрение зависимостей удельных энергозатрат стадийного разрушения материалов и определения возможности описания этих зависимостей с помощью аналитических выражений, схожих с моделями «размер-энергия», применяемыми при механическом дроблении.

Исследуемые материалы

Для экспериментов по определению удельных энергозатрат на электроимпульсное и электрогидроимпульсное разрушение использовались образцы следующих материалов:

- апатит-нефелиновая руда АО «Апатит»;
- железная руда комбината «ОЛКОН»;
- шлак медно-никелевого производства комбината «Североникель»;
- сrostки необработанного карбида кремния (SiC) собственного производства Волжского абразивного завода.

Руды, добываемые АО «Апатит» (рис. 1, а), представляют собой многокомпонентный материал, основную часть которого составляют минералы — фторапатит и нефелин [5]. В проведённых ранее исследованиях было установлено, что использование электроимпульсного измельчения (по сравнению с механическими методами разрушения) позволяет повысить процент высвобождения некоторых

ценных компонентов [6]. Сравнительное дробление совместно с несколькими другими минералами Кольского полуострова показало, что апатит-нефелиновая руда имеет наименьшую величину удельных энергозатрат разрушения при дроблении образцов размером порядка 150 мм до фракции менее 15 мм (табл. 1) [7].



Рис. 1. Образцы горных пород и шлака, подвергнутые электроимпульсному воздействию:
а — апатит-нефелиновая руда; *б* — железная руда; *в* — шлак медно-никелевого производства
Fig. 1. Samples of rocks and slag subjected to electric pulse treatment:
a — apatite-nepheline ore; *b* — iron ore; *c* — slag of copper-nickel production

Таблица 1

Удельные затраты энергии на электроимпульсную дезинтеграцию
некоторых горных пород Кольского полуострова до размера менее 15 мм, кВт·ч/т
Specific energy consumption for electric pulse disintegration
of some rocks of the Kola Peninsula to a size of less than 15 mm, kWh/t

Фенит штаффелизованный	Перидотит	Диабаз	Железная руда (ОЛКОН)	Апатит-нефелиновая руда
19,1	24,6	24,6	20,6	12,9

Железные руды комбината «ОЛКОН» Оленегорского рудного месторождения (рис. 1, *б*) образованы железистыми кварцитами, основу которых составляет минерал магнетит. Содержание железа в этих рудах может достигать до 30 % [8], что обуславливает их высокую проводимость и низкую подверженность электроимпульсному разрушению.

Шлаки цветной металлургии комбината «Североникель» (рис. 1, *в*) в основной своей массе состоят из матрицы, образованной алюмосиликатом кальция с примесями окислов железа и проводящих включений цветных металлов [9]. Электроимпульсное разрушение в таких композиционных материалах происходит по расположению проводящих включений, однако их большое содержание может препятствовать развитию канала разряда и снижать производительность разрушения, особенно при уменьшении размера измельчаемого материала. Промышленный процесс получения карбида кремния заключается во взаимодействии кремнезёма с углеродом при нагреве до температур 1600–2500 °С в электропечи Ачесона особой конструкции. В необработанном виде после разбивания спечённая масса представляет собой пористый с одной стороны и поликристаллический пластинчатый чёрный твёрдый материал с другой. На рис. 2 показаны куски образовавшихся при остывании расплава кристаллов. В составе этих кристаллов содержится до 93 % карбида кремния, а также в нижней части кусков находится графит, не прореагировавший с шихтой в процессе изготовления.



Рис. 2. Образцы необработанной друзы карбида кремния после процесса спекания
Fig. 2. Samples of untreated drusen of silicon carbide after the smelting process

Предварительные эксперименты по воздействию высоковольтных импульсов на сродки карбида кремния показали, что материал проявляет сильные полупроводниковые свойства, то есть даже при кратковременном воздействии на него высокого напряжения его сопротивление практически мгновенно уменьшается до уровня единиц ома и формирования канала пробоя не происходит. На рис. 3 приведены совмещенные осциллограммы напряжения (3, а) разряда ёмкости 0,4 мкФ на электродную систему «остриё-остриё» с образцом SiC, а также импульсные токи и расчетные зависимости импульсного сопротивления образца (3, б). Исходя из определённых выше свойств, в данной работе для разрушения карбида кремния применялся электрогидроимпульсный метод.

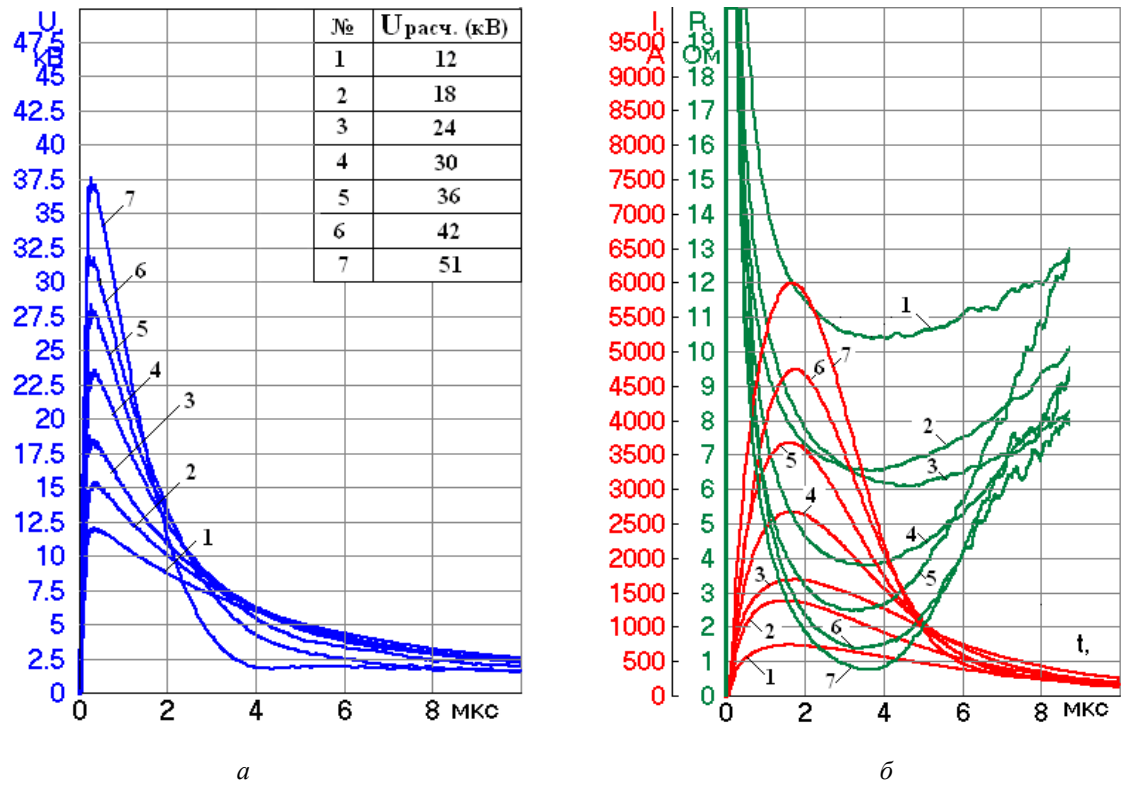


Рис. 3. Параметры тестовых импульсных разрядов на образец SiC:
a — осциллограммы импульсов напряжения на электродной системе с образцом; *б* — осциллограммы импульсного тока через образец и расчётные кривые сопротивления
Fig. 3. Parameters of test pulse discharges on the SiC sample:
a — oscillograms of voltage pulses on the electrode system with the sample; *б* — oscillograms of pulse current through the sample and calculated resistance curves

Устройства дезинтеграции

В процессе определения удельных энергозатрат разрушения материалов использовались следующие установки:

- семиступенчатый генератор импульсных напряжений (ГИН) с запасаемой в накопителях энергией до 1,4 кДж, создававший импульсы с длительностью фронта порядка 150 нс и амплитудой напряжения до 320 кВ (рис. 4, а);
- генератор импульсных токов (ГИТ), составленный из трёх параллельно подключенных конденсаторов общей ёмкостью 2 мкФ (рис. 4, б).

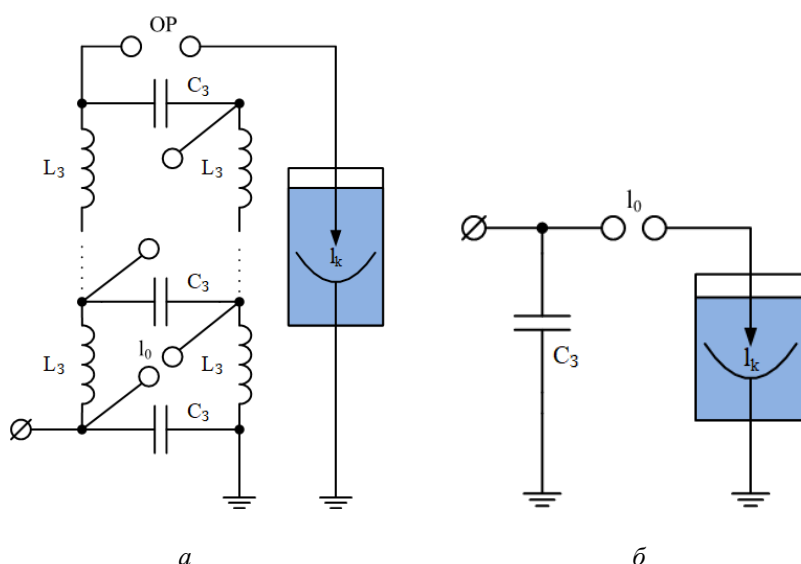


Рис. 4. Схемы экспериментальных установок:

а — генератор импульсных напряжений (ГИН); б — генератор импульсных токов (ГИТ); l_0 — задающий разрядник; OP — отделительный разрядник ГИН; C_3 — зарядная ёмкость; L_3 — зарядная индуктивность

Fig. 4. Schematics of experimental setups:

а — pulse voltage generator (PVG); б — pulse current generator (PCG); l_0 — initiating spark gap; OP — separating spark gap of PVG; C_3 — charging capacitance; L_3 — charging inductance

Первый генератор применялся для электроимпульсного дробления горных пород и шлака, второй — для электрогидравлического разрушения сростков и кристаллов карбида кремния. Рабочей ёмкостью для разрушения являлась дробильно-измельчительная камера, которая состояла из следующих компонентов: полиэтиленовой изоляционной стенки с закреплённой внутри электродной системой «потенциальное остриё — заземлённое сито» и металлического бака под ситом для сбора раздробленного продукта. Конструкция камеры представлена в работе [6]. В стадийном разрушении использовались стальные сита чашеобразной формы с круглыми отверстиями диаметром 15, 5, 3, 2 и 1 мм для вывода материала из зоны разрушения. Размер ячеек сит определяет максимальную крупность продукта на данной стадии. В случае электроимпульсного воздействия объёмы навесок образцов для фрагментации выбирались таким образом, чтобы рабочий промежуток всегда оставался заполненным; тем самым предотвращалось изменение характера воздействия на электрогидроимпульсное.

Дробление горных пород проводилось при максимальных параметрах ГИН — 315 кВ и 1400 Дж в импульсе; воздействие на медно-никелевый шлак осуществлялось в режиме ГИН с напряжением 224 кВ и энергией в импульсе порядка 720 Дж. Электрогидравлическое воздействие на фрагменты друзы карбида кремния проходило при напряжении пробоя задающего промежутка 45 кВ и уровне запасённой энергии 2000 Дж.

Результаты исследований

В технологических циклах механического дробления горных пород для оценки энергии, которую необходимо затратить на доведение подаваемого в щековую и валковую дробилку материала

от исходного размера до размера продукта используются различные модели соотношения «размер-энергия», обобщённые Хукки [10]:

$$e = W \left(\frac{1}{r_p^{f(r_p)}} - \frac{1}{r_f^{f(r_f)}} \right), \quad (1)$$

где e — удельные энергозатраты, кВт·ч/т; W — индекс измельчаемости (work index), кВт·ч/т; f , p — сокращения от подаваемого в дробилку материала (питание, feed) и измельчённого (продукт, product); r_f и r_p — характерный размер частиц исходного материала и конечного продукта соответственно, мм; $f(r)$ — экспонента Хукки, функция характеристического размера.

Аналогичные выражения можно использовать и для описания энергозатрат на дробление при электрофизических методах воздействия с учётом особенностей разрушающего инструмента — системы электродов. В табл. 2 представлены данные удельных энергий разрушения исследованных материалов в стадийном процессе, при котором раздробленный продукт с предыдущей стадии разделяется на фракции, минимальная фракция отделяется, а остальные идут на соответствующие следующие стадии.

Таблица 2

Удельные энергозатраты на электроимпульсное дробление
исследованных материалов на различных стадиях, кВт·ч/т
Specific energy consumption for electric pulse crushing of the studied materials at different stages, kWh/t

Материал	Стадии дробления (размер ячеек сита)			
	I (15 мм)	II (5 мм)	III (2 мм)	IV (1 мм)
Апатит-нефелиновая руда	12,9	22,4	39,8	—
Железная руда	20,6	37,2	89,4	—
Медно-никелевый шлак	14,2	22,3	58,2	169,9
Карбид кремния	8,4	49,4	106,2*	—

* Размер ячеек сита 3 мм.

Анализ результатов показал, что полученные значения энергозатрат для стадийного процесса достаточно хорошо аппроксимируются показательными кривыми вида (рис. 5):

для электроимпульсного воздействия

$$E_S = C_1 (C_2 l^k + 1) \quad (2)$$

для электрогидроимпульсного воздействия

$$E_S = C_1 (C_2 l^k - 1), \quad (3)$$

где E_S — энергоёмкость доведения материала до предельного крупного размера фрагментов, ограничиваемого диаметром отверстий сита на данной стадии, кВт·ч/т; l — диаметр отверстий сита, определяющий максимальный размер получаемого продукта измельчения, мм; C_1 , C_2 , k — коэффициенты, зависящие от технологических и энергетических параметров процесса дробления.

В программном комплексе MathCAD с помощью функции `genfit()` по методу наименьших квадратов были подобраны коэффициенты для зависимостей удельной энергии разрушения, наилучшим образом совпадающих с экспериментальными данными. Полученные коэффициенты и параметры электроимпульсного воздействия представлены в табл. 3.

Низкие относительно других образцов удельные энергозатраты на разрушение карбида кремния в первой стадии объясняются характерным размером сrostков кристаллов (пластинчатые, порядка 1 см в длину) и хрупкостью их конгломератов. В основании сrostки соединяются только хрупкой

матрицей из смеси кристаллов с непрореагировавшим графитом, однако уже после достижения крупности дробления в 5 мм энергозатраты на разрушение SiC начинают превышать энергозатраты на электроимпульсную дезинтеграцию руд и шлака, что характерно для электрогидроимпульсного метода разрушения.

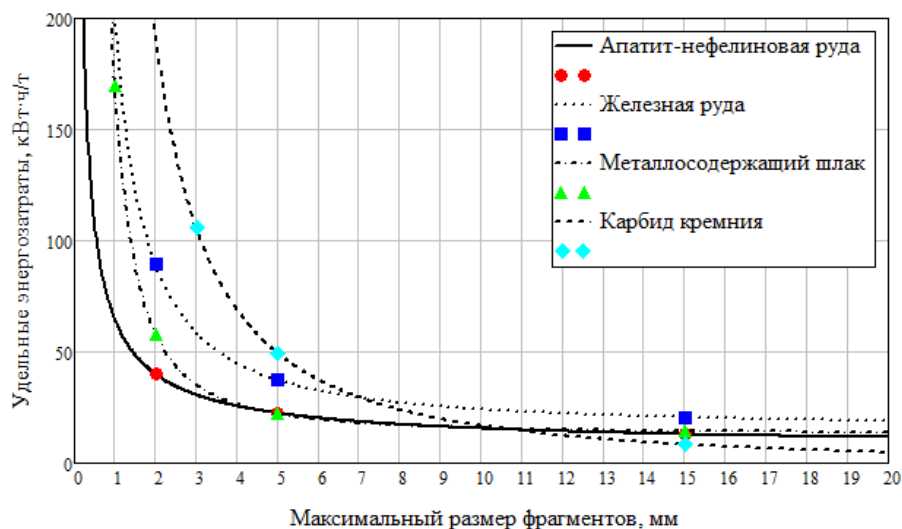


Рис. 5. Зависимости удельных энергетических затрат на разрушение исследованных материалов от максимального размера фрагментов продукта

Fig. 5. Dependences of specific energy consumption for the destruction of the studied materials on the maximum size of the product fragments

Таблица 3

Коэффициенты для описания характеристик удельных энергозатрат
Coefficients to describe the characteristics of specific energy consumption

Материал	Напряжение воздействия, кВ	Энергия в импульсе, Дж	C_1	C_2	k
Железная руда	315	1400	15,648	11,931	1,340
Медно-никелевый шлак	224	720	13,260	11,810	1,797
Апатит-нефелиновая руда	315	1400	6,169	9,492	0,798
Карбид кремния	45	2000	1,990	269,793	1,458

Требуются дальнейшие исследования для того, чтобы определить, от каких геометрических параметров образцов и технологических параметров установки зависят значения полученных коэффициентов. На данном этапе можно предположить, что коэффициент C_2 реагирует на степень проявления проводимости у материалов, поскольку его значение уменьшается с переходом от полупроводящего карбида кремния к практически непроводящей апатит-нефелиновой руде, состоящей из фторфосфата кальция и алюмосиликатов натрия и калия.

Выводы

Проведённые исследования энергозатрат на разрушение различных естественных и искусственных материалов электроимпульсным и электрогидроимпульсным методами показали возможность использования моделей «размер-энергия» для описания зависимостей эффективности дробления материалов от крупности конечного продукта. Однако для раскрытия и уточнения параметров, входящих в выражения для данных моделей, требуется проведение более детальных исследований.

Анализ удельных энергозатрат на дробление различных материалов также позволяет выделить одну общую черту, присущую разрушению всех представленных в работе образцов, — резкое снижение дробимости материалов и эффективности процесса при достижении крупности разрушения менее 2 мм, что может указывать на границу целесообразности применения электрофизических методов разрушения в целом. Использование этих методов для получения более мелкого продукта может быть оправдано только в случае специфических условий, где проявляются их преимущества по сравнению с механическим дроблением, например, при измельчении особо твёрдых материалов, сильно изнашивающих металлические мелющие тела.

Список источников

1. Microstructural investigation of complex ores processed with electric impulses / M. Mezzetti [et al.] // IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress. 2018. P. 481–489.
2. Che L., Gu X., Li H. Numerical analysis and experimental research on hard rock fragmentation by high voltage pulse discharge // Minerals Engineering. 2021. Vol. 168. P. 106942.
3. Razavian S., Rezai B., Irannajad M. Investigation on pre-weakening and crushing of phosphate ore using high voltage electric pulses // Advanced Powder Technology. 2014. Vol. 25, No. 6. P. 1672–1678.
4. Исследование возможности извлечения цветных металлов и производства строительных материалов из шлаков медно-никелевого производства / А. В. Светлов [и др.] // Вестник МГТУ. 2015. Т. 18, № 2. С. 335–344.
5. Нерадовский Ю. Н., Компанченко А. А., Мирошникова Я. А. Твёрдость главных минералов апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2019. № 16. С. 408–412.
6. Потокин А. С., Климов А. А., Колобов В. В. Исследование горных пород с обогатительных комбинатов Мурманской области на лабораторном образце электроимпульсной дезинтеграционной установки // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2022. Т. 13, № 3. С. 97–110.
7. Потокин А. С., Климов А. А. Сравнительный анализ эффективности электроимпульсного разрушения различных типов горных пород Мурманской области // Труды Кольского научного центра РАН. 2020. Т. 11, № 7 (19). С. 92–97.
8. Оленегорское месторождение // География России: энциклопедический словарь / гл. ред. А. П. Горкин. М.: Большая Российская энциклопедия, 1998. 800 с.
9. Оценка селективности дезинтеграции металлургических шлаков / И. В. Шадрюнова [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 5. С. 180–190.
10. Hukki R. T. Proposal for a Solomonian Settlement between the Theories of von Rittinger, Kick and Bond // Transactions on AIME. 1961. Vol. 220. P. 403–408.

References

1. Mezzetti M., Popov O., Lieberwirth H., Anders E., Voigt M., Hoske P. Microstructural investigation of complex ores processed with electric impulses. IMPC 2018 — 29th International Mineral Processing Congress, 2018, P.481–489.
2. Che L., Gu X., Li H. Numerical analysis and experimental research on hard rock fragmentation by high voltage pulse discharge. Minerals Engineering, 2021, Vol. 168, pp. 106942.
3. Razavian S., Rezai B., Irannajad M. Investigation on pre-weakening and crushing of phosphate ore using high voltage electric pulses. Advanced Powder Technology, 2014, Vol. 25, No. 6, pp. 1672–1678.
4. Svetlov A. V., Potapov S. S., Potapov D. S., Kravchenko E. A., Erohin Yu. V., Potokin A. S., Selivanova E. A., Suvorova O. V., Kumarova V. A., Nesterov D. P., Makarov D. V., Masloboev V. A. Issledovanie vozmozhnosti izvlecheniya cvetnykh metallov i proizvodstva stroitel'nykh materialov iz shlakov medno-nikelevogo proizvodstva [Study of possibility of extraction of non-ferrous metals and production of construction materials from slags of copper-nickel production]. Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [MSTU Bulletin], 2015, Vol. 18, No. 2, pp. 335–344. (In Russ.).

5. Neradovskij Ju. N., Kompanchenko A. A., Mirosnikova Ja. A. Tverdost' glavnyh mineralov apatit-nefelinovyh rud Hibinskih mestorozhdenij [Hardness of the main minerals of apatite-nepheline ores of Khibiny deposits]. *Trudy Fersmanovskoj nauchnoj sessii GI KNC RAN* [Proceedings of the Fersman scientific session of the Institute of the KSC RAS], 2019, No. 16, pp. 408–412. (In Russ.).
6. Potokin A. S., Klimov A. A., Kolobov V. V. Issledovanie gornyh porod s obogatitel'nyh kombinatov Murmanskoy oblasti na laboratornom obrazce jelektroimpul'snoj dezintegracionnoj ustanovki [Study of rocks from enrichment plants of Murmansk region on a laboratory sample of electric-pulse disintegrating unit]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tehnicheskie nauki* [Proceedings of Kola Scientific Center of RAS. Series: Technical Sciences], 2022, Vol. 13, No. 3, pp. 97–110. (In Russ.).
7. Potokin A. S., Klimov A. A., Kolobov V. V. Issledovanie gornyh porod s obogatitel'nyh kombinatov Murmanskoy oblasti na laboratornom obrazce jelektroimpul'snoj dezintegracionnoj ustanovki [Comparative analysis of efficiency of electric pulse destruction of different types of rocks in Murmansk region]. *Trudy Kol'skogo nauchnogo centra RAN. Seriya: Tehnicheskie nauki* [Proceedings of Kola Scientific Center RAS. Series: Technical Sciences], 2020, Vol. 11, No. 7 (19), pp. 92–97. (In Russ.).
8. Olenegorskoe mestorozhdenie [Olenegorskoye field]. *Geografija Rossii* [Geography of Russia]. Moscow, *Bol'shaja Rossijskaja jenciklopedija*, 1998, 800 p.
9. Shadrinova I. V., Ozhogina E. G., Kolodezhnaja E. V., Gorlova O. E. Ocenka selektivnosti dezintegracii metallurgicheskikh shlakov [Evaluation of selectivity of metallurgical slag disintegration]. *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh* [Physical and Technical Problems of Mineral Mining], 2013, No. 5, pp. 180–190. (In Russ.).
10. Hukki R. T. Proposal for a Solomonic Settlement between the Theories of von Rittinger, Kick and Bond. *Transactions on AIME*, 1961, Vol. 220, pp. 403–408.

Информация об авторах

А. А. Климов — младший научный сотрудник;

В. Н. Селиванов — кандидат технических наук, директор.

Information about the authors

A. A. Klimov — Researcher;

V. N. Selivanov — PhD (Engineering), Director.

Статья поступила в редакцию 11.05.2023; одобрена после рецензирования 15.05.2023; принята к публикации 29.05.2023.
The article was submitted 11.05.2023; approved after reviewing 15.05.2023; accepted for publication 29.05.2023.