

Электрогидравлическая технология разрушения монолитных объектов

Н.В. Мартынов¹, В.Н. Добромиров², В.О. Барсуков², Д.В. Аврамов¹✉

¹ НППФ «ЭлектроГидроДинамика», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ egd.spb@gmail.com

Резюме: В настоящее время существует проблема проведения безопасного и экологически чистого разрушения монолитных объектов, расположенных в ограниченных пространствах. В статье представлены результаты исследований о возможности решения этой проблемы путем замены подрыва монолитного образца с помощью взрывчатого вещества на его разрушение с использованием эффекта электрогидравлического удара. Излагается физическая сущность электрогидравлического эффекта, приведены конструктивные схемы исполнения и методика расчета оптимальных параметров разрушающего устройства. Электрогидравлические установки можно использовать на участках складирования негабаритов перед первой стадией дробления в горнорудной промышленности. Представлены результаты лабораторных опытов по электрогидравлическому разрушению гранитных объектов. Сделан вывод о перспективности применения предлагаемой технологии для дробления монолитных материалов в виде негабаритных кусков скальной породы, валунов, мёрзлого грунта, льда, бетонных и железобетонных конструкций. Полученные в ходе исследования результаты подтверждают практическую возможность экологически чистого и безопасного разрушения твердых монолитных пород на основе использования эффекта электрогидравлического удара.

Ключевые слова: монолитные материалы, дробление, электрогидравлический эффект, технология разрушения

Для цитирования: Мартынов Н.В., Добромиров В.Н., Барсуков В.О., Аврамов Д.В. Электрогидравлическая технология разрушения монолитных объектов. *Горная промышленность*. 2021;(2):132–136. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-132-136.

Electrohydraulic Technology for Breaking Solid Objects

N.V. Martynov¹, V.N. Dobromirov², V.O. Barsukov², D.V. Avramov¹✉

¹ ElektroGidroDinamika Scientific-Production Company, St. Petersburg, Russian Federation

² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation
✉ egd.spb@gmail.com

Abstract: Currently there exists a problem of carrying out a safe and environmentally friendly breaking of solid objects located in confined spaces. The article presents the results of studying the possibility of solving this problem by replacing blasting of a solid structure with explosives with its breaking using the electrohydraulic shock effect. The physical nature of the electrohydraulic effect is described, the design diagrams and the method of calculating the optimum parameters of the breaking device are given. Electrohydraulic units can be used in the boulder storage areas prior to the first crushing stage in the mining industry. The results of laboratory experiments on electrohydraulic crushing of granite objects are presented. A conclusion is made that the proposed technology is potentially effective for crushing solid materials, e.g. oversized blocks of rock, boulders, frozen ground, ice, concrete and reinforced concrete structures. The results obtained during the study confirm the practical possibility of environmentally friendly and safe breaking of solid rocks using the effect of electrohydraulic impact.

Keywords: solid materials, crushing, electrohydraulic effect, breaking technology

For citation: Martynov N.V., Dobromirov V.N., Barsukov V.O., Avramov D.V. Electrohydraulic Technology for Breaking Solid Objects. *Gornaya promyshlennost = Russian Mining Industry*. 2021;(2):132–136. (In Russ.) DOI: 10.30686/1609-9192-2021-2-132-136.

Введение

При выполнении горнорудных, строительных, фортификационных и ряда других работ часто возникает проблема безопасного и экологически чистого дробления монолитных материалов: негабаритных кусков скальной породы, валунов, мёрзлого грунта, льда, бетонных и железобетонных конструкций и т.п. Наиболее распространенный в настоящее время способ разрушения – это использование взрывной технологии, а также в доступных местах механическое поэтапное разрушение отбойными и гидравлическими молотами и разбутовщиками. Однако применение

вышеописанных методов в отдельных случаях проблематично для взрыва и малоэффективно для механического разрушения. При этом основными ограничениями для взрывных работ являются негативные экологические факторы, в первую очередь пылеобразование; обеспечение безопасности от поражающих факторов взрыва в виде воздействия осколков разрушаемого материала; сложность реализации при подрыве объектов относительно небольших размеров. Решение проблемы возможно путем замены подрыва образца с помощью взрывчатого вещества его разрушением с использованием действующих факторов

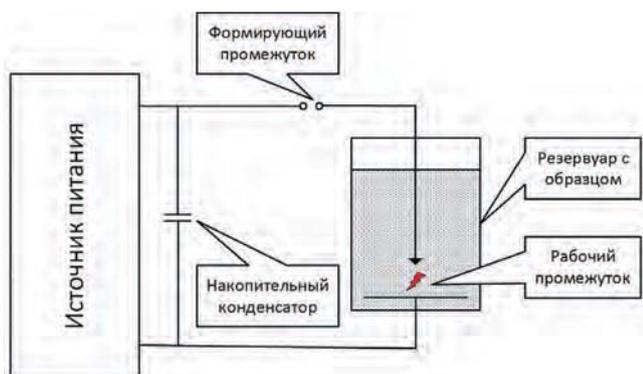


Рис. 1
Схема электрогидравлической установки

Fig. 1
Schematic diagram of the electrohydraulic unit

электрогидравлического эффекта (эффекта Юткина), для чего используется мощный искровой электрический разряд в жидкости [1–5].

Схема установки для электрогидравлического разрушения и измельчения твердых пород представлена на рис. 1.

Действующие факторы электрогидравлического эффекта включают в себя сверхвысокие гидравлические давления, перемещения жидкости с высокими скоростями, мощные кавитационные процессы, инфра- и ультразвуковые излучения, механические резонансные явления. При этом ключевым фактором разрушающего воздействия является сверхвысокое гидравлическое давление в зоне разряда. Подбор исходных электрических параметров позволяет регулировать это давление, обеспечивая выборочное разрушение компонентов обрабатываемого материала [6–8].

Оборудование и методы

Для разрушения монолитного объекта предлагается использовать воздействие ударной волны, распространяющейся в жидкости, заполняющей предварительно просверленный в нем шпур. Инициатором пробоя является разрядный промежуток между рабочим электродом и корпусом рабочего устройства (рис. 2). При осуществлении внутри жидкости, находящейся в закрытом объеме, специально сформированного импульсного электрического (искрового, кистевого и других форм) разряда вокруг зоны его образования возникают сверхвысокие гидравлические давления, способные совершать полезную механическую работу. При правильном подборе параметров установки энергии, сгенерированной в шпуре ударной волны, достаточно для образования, распространения трещин в монолите и его разрушения.

Недостатком представленной конструкции является то, что накопленная в конденсаторе энергия тратится на образование стримера в жидкости, возникновение искры и разряда конденсатора. Таким образом, часть энергии, которая могла бы перейти в энергию ударной волны, тратится непродуктивно. Соединение разрядного промежутка специальным проводником позволяет изменить механизм иницирования разряда и исключить этот недостаток.

При подаче напряжения на иницирующий проводник плотность тока в нём настолько велика, что проводник практически мгновенно разрушается (испаряется) в объеме жидкости. Из-за резкого увеличения сопротивления ток падает до нуля, не успев достигнуть хоть сколько-нибудь значительной величины (паузы тока), а все напряжение, практически равное напряжению заряда конденсаторной батареи, прикладывается к разрядному промежутку, в ко-

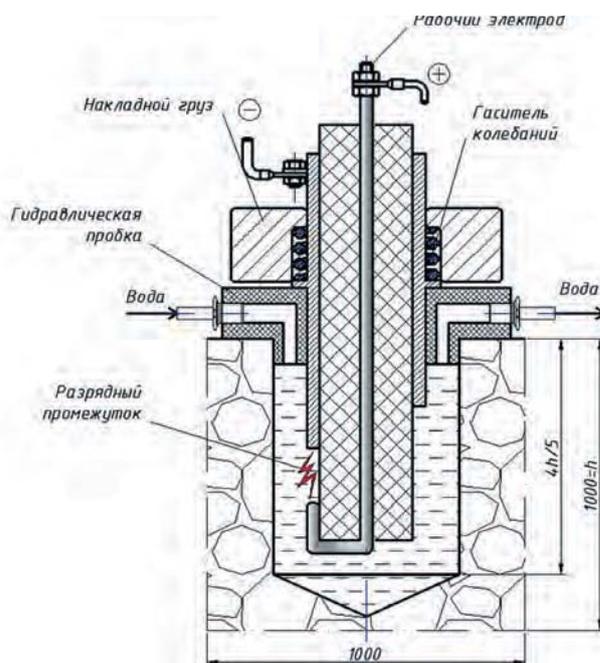


Рис. 2
Конструктивная схема электрогидравлического разрушающего устройства

Fig. 2
Structural diagram of the electrohydraulic breaking device

тором образовалась газовая дорожка из продуктов взрыва проводника. Через образовавшийся канал происходит разряд, в результате которого возникает ударная волна. Эффект, наблюдаемый при взрыве проводника под водой с последующим разрядом конденсатора, который является источником импульсных давлений в образовавшейся полости, получил название теплового эффекта. Конструктивная схема рабочего устройства, основанная на использовании теплового эффекта, представлена на рис. 3.

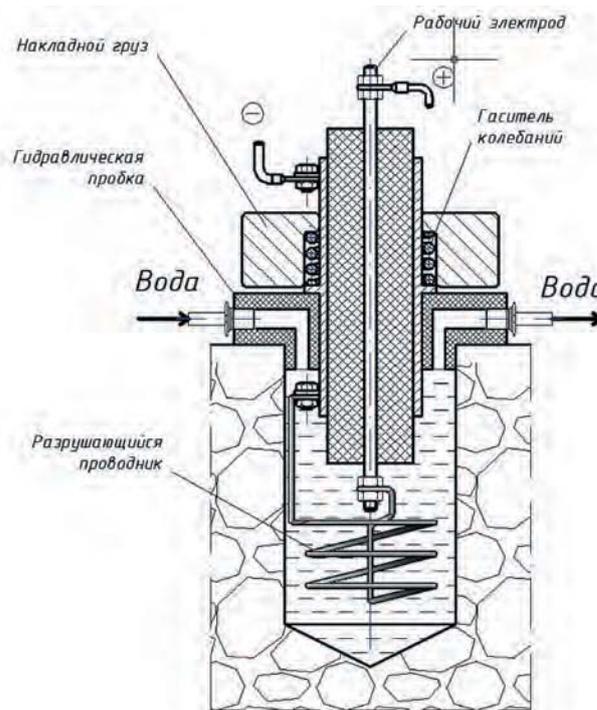


Рис. 3
Конструктивная схема разрушающего устройства, основанного на использовании теплового эффекта

Fig. 3
Structural diagram of the breaking device that uses the thermal effect

В такой конструкции взрывающийся проводник используется в качестве инициатора разряда и регулятора скорости ввода энергии в разрядный промежуток. При этом основное выделение энергии подводного электрического взрыва начинается после окончания стадии нагрева и расплавления металлического проводника под действием электрического тока, когда он переходит в парожидкостное состояние (собственно взрыв проводника). Скорость расширения канала разряда при этом резко увеличивается, что приводит к образованию в жидкости ударной волны. В момент времени, когда напряжение достигает максимальной величины, происходит пробой внутри парожидкостного канала разряда и превращение его в плазменный. При этом каналом излучается вторая волна давления, догоняющая первую [9; 10].

Условие оптимальности взрыва проводника, когда энергия, запасенная в конденсаторной батарее, выделяется в течение первого импульса тока разряда с максимальной скоростью из требования максимума мощности, определяется соотношением диаметра $d_{опт}$ и длины проводника $l_{опт}$ [11; 12]:

$$\begin{cases} d_{опт} = 2 \left[\frac{W_0}{z \rho_n \sigma_{п0} (\lambda_n + \gamma_n)} \right]^{1/4}, \\ l_{опт} = 2 \cdot 10^{-3} U_0 \sqrt{LC} \end{cases} \quad (1)$$

где W_0 – запасенная энергия конденсаторной батареи, $W_0 = CU_0^2/2$; ρ_n – плотность проводника; $\sigma_{п0}$ – удельная электропроводность проводника; λ_n – удельная теплота плавления проводника; γ_n – удельная теплота парообразования металла проводника; z – волновое (характеристическое) сопротивление электрической цепи, $z = \sqrt{L/C}$; U_0 – начальное напряжение на конденсаторной батарее; C – емкость конденсаторной батареи; L – индуктивность разрядного контура.

Расчет параметров проводника на основании варьирования задаваемыми параметрами электрического контура, выполненный по формулам (1), позволяет выбрать режим взрыва, обеспечивающий равномерный нагрев проводника как по длине, так и по его сечению вплоть до начала испарения. При этом скорость выделения энергии в канале разряда является максимально возможной для всех параметров, удовлетворяющих этим соотношениям, что и обеспечивает наибольшее механическое воздействие подводного электрического взрыва проводника на обрабатываемый объект.

Результаты исследования

В ходе исследования возможности электрогидравлического дробления твердых монолитных пород научно-производственной фирмой «ЭлектроГидроДинамика» (г. Санкт-Петербург) была проведена серия опытов по тепловому разрушению гранита. Целью исследования являлось установление закономерностей изменения оптимальных длины и диаметра иницирующего проводника в зависимости от индуктивности разрядного контура при заданных параметрах емкости накопительного конденсатора и начального напряжения на конденсаторной батарее. Расчетное определение оптимальных параметров проводника проводилось по зависимостям (1). В качестве проводника рассматривалась медная проволока. Напряжение и емкость конденсаторной батареи выбирались в соответствии с характеристиками экспериментальной электрогидравлической установки, обладающей возможностью регулирования индуктивности ее электрического контура. Рассматривались два варианта расчетов, отличающиеся значениями заданных постоянных: первый – начальное напряжение на конденсаторной батарее $U_0 = 25$ кВ,

емкость конденсаторной батареи $C = 16$ мкФ; второй – $U_0 = 25$ кВ, $C = 10$ мкФ. Индуктивность варьировалась в диапазоне от 0,05 до 0,3 мкГн с шагом 0,05 мкГн. Исходные данные по физическим характеристикам меднопроволочного проводника приведены в табл.1.

Таблица 1
Физические характеристики меди

Параметр *	$\rho_n, \text{кг/м}^3$	$\sigma_{п0}, \text{См/м}$	$\lambda_n, \text{кДж/кг}$	$\gamma_n, \text{кДж/кг}^{**}$
Значение параметра	8900	$59,5 \cdot 10^6$	$2,1 \cdot 10^5$	4790

* – обозначения параметров соответствуют принятым в формулах (1).
** – при $t_{крит} = 2590$ °С и $\rho = 101,3$ Па.

Table 2
Physical properties of copper

На основании полученных результатов расчетов построены графические полиномиальные зависимости $d_{опт}$ и $l_{опт}$ от L , (рис. 4), позволяющие определять соотношение оптимальных параметров проводника при заданных электрических параметрах электрогидравлической установки.

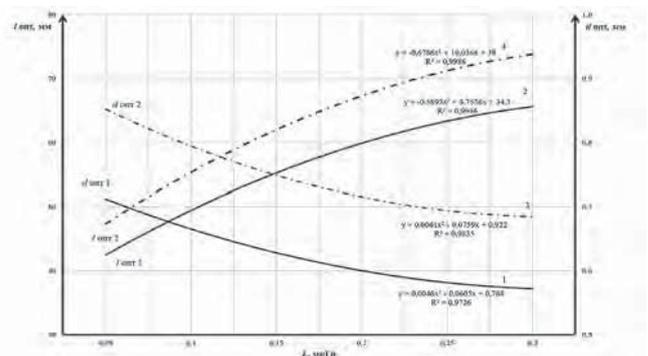


Рис. 4
График изменения оптимальных параметров проводника в зависимости от индуктивности электрического контура установки

Fig. 4
Diagram of the optimum conductor parameters as a function of the electrical circuit inductance of the unit

По полученным зависимостям были подобраны оптимальные значения параметров проводников для экспериментальных исследований при фактическом значении индуктивности электрического контура установки $L = 0,2$ мкГн:

- для $U_0 = 25$ кВ, $C = 10$ мкФ и выбранном диаметре проволоки 0,6 мм оптимальная длина проводника составила 60 мм;
- для $U_0 = 25$ кВ, $C = 16$ мкФ и $L = 0,2$ мкГн оптимальный диаметр проволоки составил 0,72 мм, а ее оптимальная длина – 67 мм.

Опыты проводились на монолитных образцах гранитной породы весом от 125 до 132 кг. В первой серии испытаний образцы подвергались воздействию при параметрах $U_0 = 25$ кВ, $C = 10$ мкФ и выбранном диаметре проволоки 0,6 мм с оптимальной длиной 60 мм при энергии импульса 5 кДж. Во второй серии – при параметрах $U_0 = 25$ кВ, $C = 16$ мкФ и выбранном диаметре проволоки 0,7 мм с оптимальной длиной 67 мм при энергии импульса 3,125 кДж. В качестве проводников была использована проволока медная круглая холоднокатаная М1М по ТУ16-705.492-2005: с диаметром 0,6 мм, закрепленная к электродам в виде U-образной дуги; с диаметром 0,7 мм – в виде спирали диаметром 11 мм. Рабочий элемент установки, выполненный по типу, изображенному на рис. 3, вставлялся в шпур, пробуренные в образцах на глубину 250 мм (рис. 5) и заполненные водой. Во всех случаях после подачи импульсов имело место разрушение образцов (рис. 6, 7).



Рис. 5
Шпур для установки рабочего элемента в образце

Fig. 5
A borehole for placing the working element in the specimen



Рис. 7
Результаты электрогидравлического разрушения гранитных образцов

Fig. 7
Results of electrohydraulic breaking of granite specimens



Рис. 6
Фрагмент электрогидравлического разрушения гранитного образца

Fig. 6
A fragment, created by electrohydraulic breaking of a granite specimen

В интересах повышения эффективности процесса разрушения была проведена оценка влияния на него глубины шпура. Установлено, что наилучшие результаты достигаются при глубине, составляющей 4/5 от толщины объекта в направлении бурения шпура.

Использованный в опытах вариант рабочего устройства не позволяет проводить работы при горизонтальном и направленном вертикально вверх расположении шпуров. В таких случаях рекомендуется применять вставные патроны, в которых разрушающийся проводник и жидкостная рабочая среда располагаются в герметичном тонкостенном корпусе (рис. 8).

Условие успешного применения патрона – относительно малая толщина оболочки и плотное её прилегание к стенкам шпура. Тонкая оболочка позволяет передать энергию ударной волны с минимальными потерями на разрыв материала, а минимизация воздушного пространства между стенками шпура и оболочкой патрона повысит эффективность ударной волны.

Список литературы

1. Багажков И.В., Смирнов В.А. Взрывные технологии демонтажа конструкций при чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера. *Пожарная безопасность: проблемы и перспективы*. 2016;(1):225–227.
2. Фахратов М.А., Сулейманов Х.А., Болотин О.А. Особенности бетонирования и демонтажа зданий в рамках поэтапной системы. *Инновации и инвестиции*. 2018;(4):341–344.
3. Бакунов С.Е., Коровин А.А., Федоров Д.С., Бабэлуэ К.Д. Бетонирование и демонтаж зданий. В: *Инновационные научные исследования: теория, методология, практика: сб. ст. 17-й Международ. науч.-практ. конф., Пенза, 27 мая 2019 г.* Пенза: Наука и просвещение; 2019. С. 108–110.
4. Войтенко Н.В., Юдин А.С., Кузнецов Н.С. Применение электроразрядного способа для разрушения негабаритов и откола от массива горных пород при добыче природных ресурсов. В: Дмитриев А.Ю. (ред.) *Проблемы геологии и освоения недр: труды 20-го Международ. симпозиума им. Акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета, Томск, 4–8 апр. 2016 г.* Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический

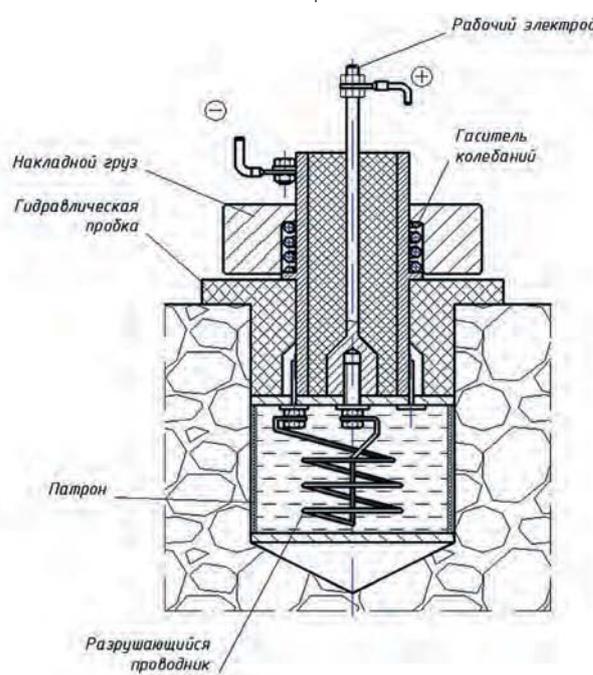


Рис. 8
Вставной патрон

Fig. 8
Insert cartridge

Заключение

Полученные в ходе исследования результаты подтверждают практическую возможность экологически чистого и безопасного разрушения твердых монолитных пород на основе использования эффекта электрогидравлического удара.

По мнению авторов, подобные установки можно использовать на участках складирования негабаритов перед первой стадией дробления в горнорудной промышленности.

- университет; 2016. С. 606–608. Режим доступа: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/32042/1/conference_tpu-2016-C11_V2_p607-609.pdf
5. Иванов Н.А., Пивоваров М.И., Войтенко Н.В., Юдин А.С. Шпуровое разрушение горных пород и бетона. *Известия Томского политехнического университета*. 2012;(2):136–140.
6. Аврамов Д.В., Добромиров В.Н., Мартынов Н.В. Электрогидравлический способ обогащения золотосодержащей глинистой руды коры выветривания. *Золотодобыча*. 2019;(7):13–18. Режим доступа: <https://электродинамика.рф/dokumenti-materiali/elektrogidravlicheskiy-sposob-obogascheniya-zolotosoderzhashej-glinistoj-rudi-kori-vivetrivaniya>
7. Мартынов Н.В., Добромиров В.Н., Аврамов Д.В. Электрогидравлическая технология дезинтеграции алмазосодержащих пород. *Обогащение руд*. 2020;(1):8–14. DOI: 10.17580/or.2020.01.02.
8. Аврамов Д.В., Мартынов Н.В., Добромиров В.Н. Электрогидравлическая технология раскрытия минералов. В: *Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики. IPDME-2020: Междунар. науч.-практ. конф., Санкт-Петербург, 23–24 апр. 2020 г.* СПб.: Санкт-Петербургский горный университет; 2020. С. 142–147.
9. Zia M., Fazli A., Soltanpour M. Warm electrohydraulic forming: A novel high speed forming process. *Procedia Engineering*. 2017;207:323–328. DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.782.
10. Liu K., Kang S., Cao Z., Liu R., Ding Z. Angle and Force Hybrid Control Method for Electrohydraulic Leveling System with Independent Metering. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021: 6642597. DOI: 10.1155/2021/6642597.
11. Abouwda K., Okhotnikov I., Noroozi S., Godfrey P., Dupac M. A review of electrohydraulic independent metering technology. *ISA Transactions*. 2020;98:364–381. DOI: 10.1016/j.isatra.2019.08.057.
12. Wei Y., Zhang F., Wei B., Xu H., He K. Experimental and numerical analyses of tubular electrohydraulic forming process. *Key Engineering Materials*. 2021;871:80–86.

References

1. Bagazhkov I.V., Smirnov V.A. Explosive technologies for demolition of structures in natural and man-made emergencies. *Pozharnaya bezopasnost = Fire Safety*. 2016;(1):225–227. (In Russ.)
2. Fakhratov M.A., Suleymanov Kh.A., Bolotin O.A. Features of concreting and dismantling of buildings within the framework of the pelement system. *Innovatsii i investitsii*. 2016;(1):225–227. (In Russ.)
3. Bakunov S.E., Korovin A.A., Fedorov D.S., Babalau K.J. Concreting and dismantling of buildings. In: *Innovative scientific research: theory, methodology, practice: XVII International scientific conference, Penza, 27 May 2019*. Penza: Nauka i prosveshchenie; 2019, pp. 108–110. (In Russ.)
4. Voitenko N.V., Yudin A.S., Kuznetsov N.S. Application of electrodischarge method for destruction of oversize blocks and breaking pieces off the rock massif in mining operations. In: Dmitriev A.Yu. (ed.) *Issues in geology and subsoil development: Proceedings of XX International Symposium named after Academician M.A. Usov for students and young scientists dedicated to the 120th anniversary of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 4-8 April 2016*. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University; 2016, pp. 606–608. (In Russ.) Available at: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/32042/1/conference_tpu-2016-C11_V2_p607-609.pdf
5. Ivanov N.A., Pivovarov M.I., Voitenko N.V., Yudin A.S. Borehole fracturing of rocks and concrete. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2012;(2):136–140. (In Russ.)
6. Avramov D.V., Dobromirov V.N., Martynov N.V. Electrohydraulic dressing method of gold-bearing clay ore of weathering crust. *Zolotodobycha*. 2019;(7):13–18. (In Russ.) Available at: <https://электродинамика.рф/dokumenti-materiali/elektrogidravlicheskiy-sposob-obogascheniya-zolotosoderzhashej-glinistoj-rudi-kori-vivetrivaniya>
7. Martynov N.V., Dobromirov V.N., Avramov D.V. Electro-hydraulic disintegration technology for diamond-bearing rocks. *Obogashchenie Rud*. 2020;(1):8–14. (In Russ.) DOI: 10.17580/or.2020.01.02.
8. Avramov D.V., Martynov N.V., Dobromirov V.N. Electrohydraulic technology for mineral release. In: *Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering (IPDME-2020): International Scientific and Practical Conference, St. Petersburg, 23–24 April 2020*. St. Petersburg: St. Petersburg Mining University; 2020, pp. 142–147. (In Russ.)
9. Zia M., Fazli A., Soltanpour M. Warm electrohydraulic forming: A novel high speed forming process. *Procedia Engineering*. 2017;207:323–328. DOI:10.1016/j.proeng.2017.10.782.
10. Liu K., Kang S., Cao Z., Liu R., Ding Z. Angle and Force Hybrid Control Method for Electrohydraulic Leveling System with Independent Metering. *Mathematical Problems in Engineering*. 2021: 6642597. DOI: 10.1155/2021/6642597.
11. Abouwda K., Okhotnikov I., Noroozi S., Godfrey P., Dupac M. A review of electrohydraulic independent metering technology. *ISA Transactions*. 2020;98:364–381. DOI: 10.1016/j.isatra.2019.08.057.
12. Wei Y., Zhang F., Wei B., Xu H., He K. Experimental and numerical analyses of tubular electrohydraulic forming process. *Key Engineering Materials*. 2021;871:80–86.

Информация об авторах

Мартынов Николай Васильевич – кандидат технических наук, заместитель генерального директора по научной работе ООО НПФ Электрогидродинамика, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Добромиров Виктор Николаевич – доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Барсуков Вячеслав Олегович – студент, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация.

Аврамов Дмитрий Витальевич – кандидат технических наук, председатель Совета директоров ООО НПФ Электрогидродинамика, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: egd.spb@gmail.com.

Information about the authors

Nikolay V. Martynov – Candidate of Technical Sciences (PhD in Engineering), Deputy Director General on Research, ElektroGidroDinamika Scientific-Production Company, St. Petersburg, Russian Federation.

Viktor N. Dobromirov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation.

Vyacheslav O. Barsukov – Student, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation.

Dmitry V. Avramov – Candidate of Technical Sciences (PhD in Engineering), Chairman of Board of Directors, ElektroGidroDinamika Scientific-Production Company, St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: egd.spb@gmail.com.

Article info

Received: 31.03.2021

Revised: 06.04.2021

Accepted: 08.04.2021

Информация о статье

Поступила в редакцию: 31.03.2021

Поступила после рецензирования: 06.04.2021

Принята к публикации: 08.04.2021