ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2020;(5):80-90
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.232.74 DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-80-90

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОЛОТА ДЛЯ БЕЗВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Е.К. Едыгенов[1], К.А. Васин[1]

[1] Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, Казахстан, Алматы, e-mail: kvas2500@mail.ru

Аннотация: Приведены результаты стендовых и полигонных испытаний опытно-промышленного образца электромагнитного молота со спаренными электромагнитными двигателями. Электромагнитный молот (ЭММ) разработан как молот среднего класса на энергию удара до 6000 Дж и изготовлен на АО «Машзавод им. С.М. Кирова» (г. Алматы, Казахстан) по инновационному гранту АО «Национальное агентство по технологическому развитию» (2016—2019 гг.). Испытания ЭММ проводились на экспериментальном стенде, оборудованном гидроподъемником, и на полигоне в качестве навесного оборудования на колесном экскаваторе марки HYUNDAI 210. Получены зависимости тягового усилия от величины хода ферромагнитных якорей и тока в индуктивных катушках электромагнитных двигателей, установлена практически линейная зависимость энергии единичного удара от величины тока, что позволяет в процессе работы регулировать энергию удара. Установлено, что конструктивные особенности электромагнитных двигателей позволяют осуществлять охлаждение индуктивных катушек как жидким, так и газообразным хладагентом, что дает возможность электромагнитному молоту выполнять работу в различных климатических условиях. Проведены испытания электромагнитного молота как навесного оборудования на экскаваторе, показавшие его функциональные возможности и работоспособность в паре с базовой машиной. Сравнение технических параметров показало, что по ряду показателей электромагнитный молот вполне способен составить конкуренцию гидромолотам.

Ключевые слова: горнодобывающее производство, безвзрывное разрушение, машины ударного действия, электромагнитный молот, стендовые испытания, полигонные испытания, тяговое усилие, энергия удара.

Благодарность: Работа выполнялась в рамках Программы целевого финансирования № BR05236712 «Технологическая модернизация горных производств на основе перехода к цифровой экономике» (2018—2020 гг.) Министерства образования и науки Республики Казахстан и инновационного гранта АО «Национальное агентство по технологическому развитию» (2016—2019 гг.).

Для цитирования: *Едыгенов Е. К., Васин К. А.* Результаты испытаний электромагнитного молота для безвзрывного разрушения горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 5. – С. 80–90. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-80-90.

Test data of electromagnetic hammer for non-explosive rock fracturing

Ye.K. Yedygenov[1], K.A. Vasin[1]

[1] D.A. Kunayev Mining Institute, Almaty, Kazakhstan, e-mail: kvas2500@mail.ru

© Е.К. Едыгенов, К.А. Васин. 2020.

Abstract: The article presents the data of the benchmark and proving-ground testing of a pilot electromagnetic hammer with coupled electromagnetic motors. The electromagnetic hammer (EMH) is designed as an average size hammer meant for blow energy to 6000 J and manufactured at the Kirov Engineering Plant (Almaty, Kazakhstan) under an innovation grant of the National Agency for Technological Development (2016–2019). The tests of EMH were performed on an experimental bench equipped by hydraulic hoister and on a proving ground as attached implements of wheel-type shovel HYUNDAI 210. The dependences of the pull on the ferromagnetic armature travel and current in the inductance coils of electromagnetic motors are obtained. It is found that the unit blow energy is almost linearly related with the current, which enables adjustment of the blow energy in operation. The design features of the electromagnetic motors enable cooling of the inductance coils with both liquid and gaseous refrigerants, which allows EMH to be operated in various climatic conditions. The tests of EMH as attached implements of the wheeled shovel demonstrated functional capabilities of the hammer and its workability with a base machine. From the comparison of engineering data, by some parameters, the electromagnetic hammer can compete over the hydraulic hammers.

Key words: mining practice, non-explosive fracturing, percussive machines, electromagnetic hammer, benchmark tests, proving-ground tests, pull, blow energy.

Acknowledgements: The work was performed in the framework of the Target Financing Program No BR05236712 «Technological Modernization of Mining Production Based on the Transition to the Digital Economy» (2018—2020) of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan and the innovation grant from JSC «The National Agency for Technological Development» (2016—2019).

For citation: Yedygenov Ye.K., Vasin K.A. Test data of electromagnetic hammer for non-explosive rock fracturing. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(5):80-90. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-80-90.

Введение

В настоящее время горнодобывающая отрасль испытывает определенные трудности, связанные с усложнением горно-геологических условий:

- переходом на добычу руд на карьерах большой глубины;
- необходимостью вовлечения в переработку руд с низким содержанием ценных компонентов;
- увеличением удельного веса руд в тонких и весьма тонких пластах, требующих селективную добычу ценных руд.

В этих условиях эффективность широко используемого буровзрывного способа добычи руд снижается, и необходимо развивать альтернативные методы и технологии безвзрывного способа разработки месторождений.

Безвзрывные методы разрушения горных пород, например гидравлический [1—6] и получившие наибольшее распространение механические методы [7—9], позволяют снизить уровень потерь за счет более тщательной проработки контактных зон породы с рудой, осуществлять селективную выемку руды, обеспечить экологическую чистоту, вести горные работы, не нарушая безопасность в близлежащих строениях, поселках, транспортных сетях.

Широкое применение получили машины ударного действия, которые эффективно работают в технологических процессах, требующих мощных концентрированных энергетических воздействий, а именно, в горнодобывающей и строительной индустрии [10—13].

Ударные машины имеют возможность производить выемку полезных ископаемых со значительным снижением их потерь, вести непрерывный контроль над качеством добытой руды, а также снижают негативное воздействие горных работ на окружающую среду, повышают безопасность горнорабочих. Поэтому на сегодняшний день актуализируются работы по повышению технологических и функциональных возможностей ударных машин и расширения области применения безвзрывных технологий.

Для разрушения горных пород и при дорожно-строительных работах в качестве навесного ударного инструмента на экскаватор в настоящее время используются гидромолоты.

Другим направлением развития ударных машин является создание электромагнитных молотов, использующих в качестве движущей силы энергию магнитного поля [14 — 21].

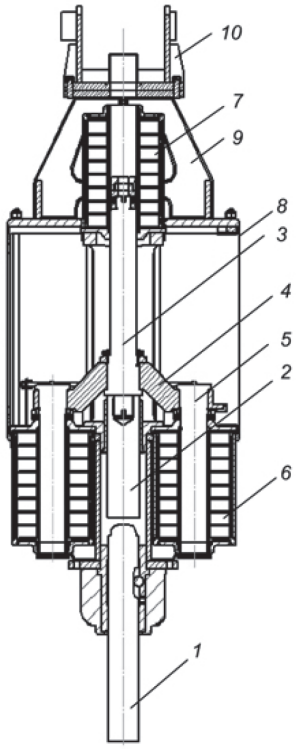

Рис. 1. Схема электромагнитного молота
Fig. 1. Diagram of an electromagnetic hammer

Методика

Стендовые испытания опытно-промышленного образца электромагнитного молота (ЭММ) проводились на экспериментальном стенде, оборудованном гидроподъемником, индуктивными датчиками SJ15-E2, пятиканальным USB осциллографом, динамометром типа ДПУ-2, измерительной вольтамперной аппаратурой и регулятором напряжения ИР-2. Испытание ЭММ на полигоне проводилось в качестве навесного оборудования на колесном экскаваторе марки HYUNDAI 210. Сетевое трехфазное напряжение 380 В подавалось на регулятор напряжения, откуда по кабелю через блок управляемых выпрямителей на ЭММ.

Основная часть

В Институте горного дела им. Д.А. Кунаева ведутся работы по созданию горных машин с электромагнитными силовыми импульсными системами, у которых электрическая энергия, преобразуясь в энергию магнитного поля, совершает механическую работу.

В настоящий момент разработана конструкция электромагнитного молота [17].

Электромагнитный молот (ЭММ) разработан как молот среднего класса на энергию удара до 6000 Дж и изготовлен на АО «Машзавод им. С.М. Кирова» (г. Алматы, Казахстан) по инновационному гранту АО «Национальное агентство по технологическому развитию» (2016 — 2019 гг.). Схема электромагнитного молота представлена на рис. 1.

ЭММ состоит из двух электромагнитных приводов прямого хода и одного — обратного хода, внутри которых перемещаются ферромагнитные якоря.

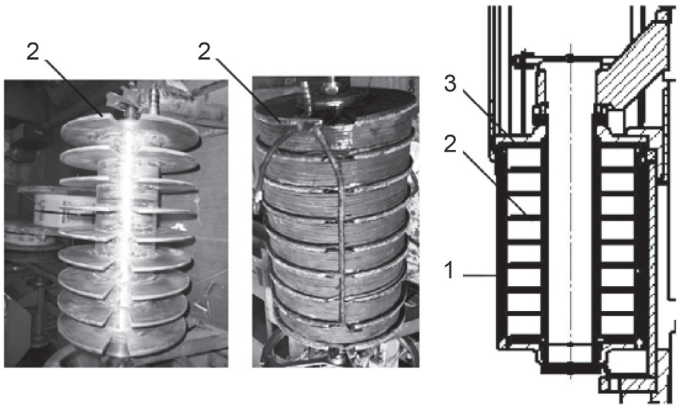

Рис. 2. Схема силового электромагнита
Fig. 2. Diagram of a power electromagnet

Электромагнитные двигатели установлены и жестко зафиксированы в обечайках *9*, связанных между собой через корпус *8* шпильками, и образуют единую конструкцию с узлом рабочего инструмента.

Каждый из двигателей включает ферромагнитный якорь *5* или *3*, размещенный внутри немагнитной направляющей, на которой установлены силовые электромагниты *6* и *7*. Электромагнитный двигатель холостого хода расположен по продольной оси корпуса.

Электромагнитный двигатель прямого хода состоит из двух спаренных электромагнитов, размещенных симметрично продольной оси корпуса. Между электромагнитными двигателями вдоль продольной оси перемещается коромысло *4*, связывающее между собой в единый подвижный узел два ферромагнитных якоря *5* и составной боек, выполняющий с одной стороны роль якоря *3*, взаимодействующего с электромагнитом холостого хода и обеспечивающего возврат подвижных элементов в исходное положение, и боек *2*, взаимодействующий с рабочим инструментом *1*. Якоря под действием магнитного поля разгоняются вместе с бойком, с которым жестко связаны при помощи коромысла. Боек, получив кинетическую энергию, передает ее рабочему инструменту для разрушения горного объекта. Адаптер *10* позволяет крепить ЭММ к экскаватору вместо ковша.

На рис. 2 показана схема силового электромагнита и фотографии каркаса до намотки провода и с намотанным проводом.

Силовые электромагниты состоят из бокового магнитопровода *1*, каркаса *2*, обмоточного провода типа ПСДК и торцевых магнитопроводов *3*. Боковой магнитопровод выполнен из стали марки Ст. 10, внутри которого расположена тонкостенная рубашка охлаждения. Габариты корпуса: высота H = 540 мм, диаметр D = 318 мм. Каркас выполнен секционным с каналами для прохождения хладагента и имеет габариты — внешний диаметр — 275 мм, длина — 491 мм. Торцевые магнитопроводы изготовлены из стали марки Ст. 10.

Конструктивная особенность электромагнитных двигателей позволяет осуществлять регулирование температурным режимом индуктивных катушек как жидкостным, так и газообразным хладагентом в условиях, например, резко-континентального климата. Электромагнитные приводы прямого и обратного хода *5* устанавливаются и фиксируются в специальных обоймах *4* (рис. 3).

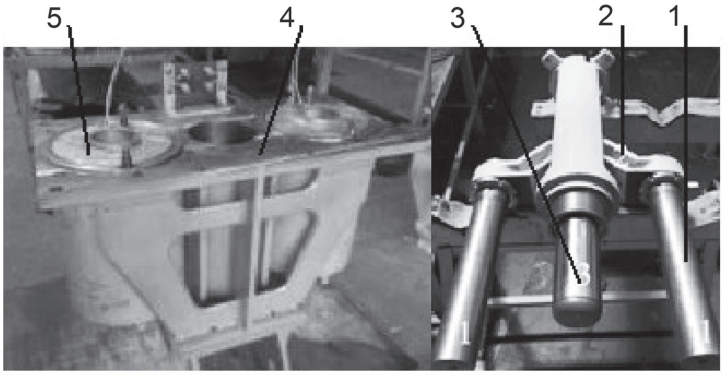

Рис. 3. Обойма с электромагнитами и подвижные детали ЭММ
Fig. 3 . A fastening holder with power electromagnets and moveable parts of the electromagnet hammer

Одними из основных элементов ЭММ, связанных с системой электромагнитных приводов, являются подвижные детали (рис. 3) — ферромагнитные якоря *1*, расположенные внутри катушки электромагнита, и жестко связанный с ними при помощи коромысла *2* боек *3*, передающий кинетическую энергию рабочему инструменту.

Боек изготовлен из упрочняемой закалкой стали марки 40Х с твердостью HRC 50…62 и размерами: диаметр D = = 125 мм, высота H = 1120 мм. Два якоря изготовлены из электромагнитной стали 12ХН3А с длиной D = 100 мм и шириной H = 1173 мм. Коромысло изготовлено из литейной стали Л25 и имеет габариты: длину L = 730 мм, ширину B = 180 мм и высоту H = 100 мм.

В процессе испытания ЭММ на стенде проводились замеры силы тяги электромагнитного двигателя от глубины внедрения ферромагнитного якоря в электромагнит при значениях тока от 70 А до 200 А.

Для измерения тягового усилия электромагнитных двигателей на стенде был установлен динамометр 11 ДПУ-2, с одной стороны закрепленный к верхней перекладине, с другой через шток связанный с подвижными элементами (ферромагнитный якорь, коромысло, боек).

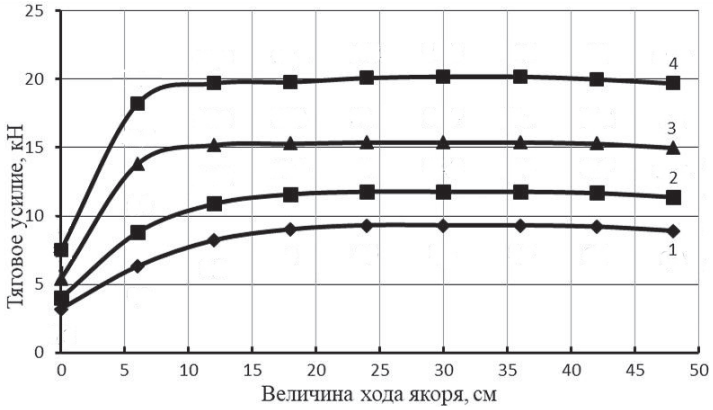

Рис. 4. Зависимость тягового усилия привода от величины хода якоря: 1 — при 70 А; 2 — при 100 А; 3 — при 150 А; 4 — при 200 А
Fig. 4. Dependence of the drive tractive effort on the current and depth of armature penetration: 1 — at 70 А; 2 — at 100 А; 3 — at 150 А; 4 — at 200 А

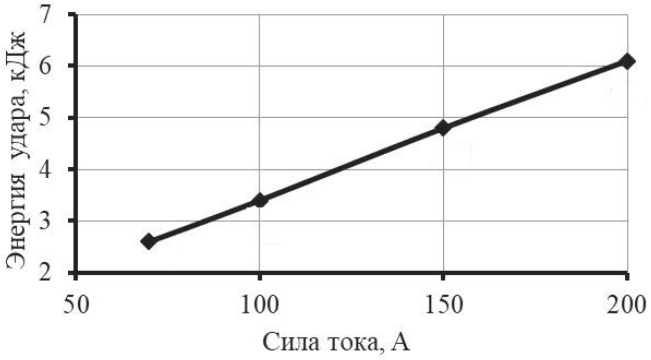

Рис. 5. Зависимость энергии единичного удара от величины тока
Fig. 5. Dependence of the energy of a single impact on the current magnitude

Результаты исследований представлены на рис. 4.

При анализе изменения величины силы тяги от глубины внедрения якоря в электромагнит видно, что максимальное значение силы тяги имеет место практически на 70% величины рабочего хода якоря. К концу рабочего хода значения тягового усилия несколько снижается, однако остается положительным для дальнейшего увеличения скорости якоря и, следовательно, бойка. На стенде была также исследована зависимость энергии единичного удара от величины тока (рис. 5). Эта зависимость имеет практически линейный характер, что дает возможность ЭММ регулировать энергию единичного удара от крепости разрушаемого объекта.

Для исследования температурного режима в индуктивных катушках при охлаждении хладагентом и без охлаж-

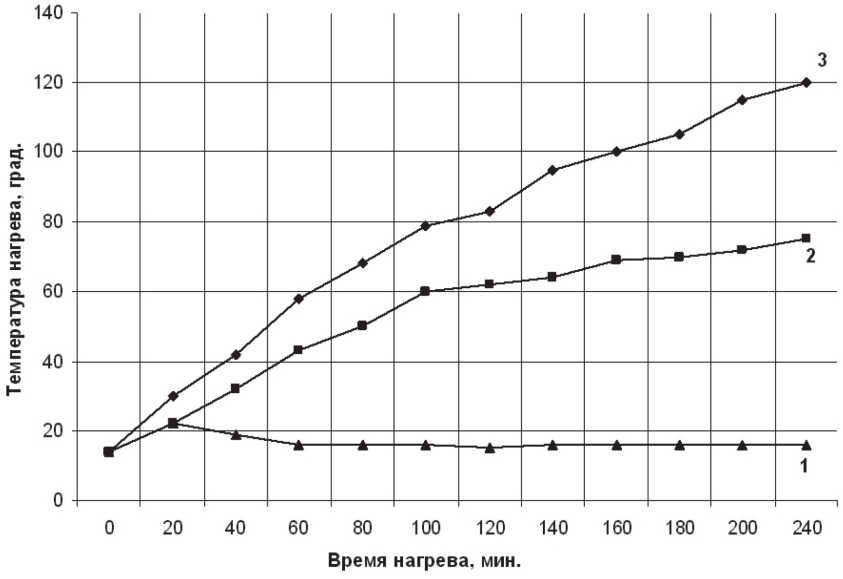

Рис. 6. Зависимость изменения температуры нагрева катушки от времени нагрева: 1 — водяное охлаждение; 2 — воздушное охлаждение; 3 — без охлаждения
Fig. 6. Dependence of the coil heating temperature on heating time: 1 — water cooling; 2 — air cooling; 3 — without cooling

Таблица 1

Техническая характеристика электромагнитного молота
Technical characteristics of the electromagnetic hammer

Параметры	Значения по результатам испытаний
Электромагнитный молот — навесное оборудование на базовую машину	
Энергия единичного удара, Дж	2600 — 6100
Высота молота, м	1,9
Масса молота, кг	1685
Число электромагнитных приводов, шт.	3
Потребляемая энергия, кВт	30 — 60
Напряжение сети, кВт	380
Блок управления	тиристорные преобразователи
Охлаждение электромагнитных приводов	воздушно-жидкостное

дения в катушки при намотке встраивались термодатчики.

При эксперименте на катушки подавался ток в 50 А. Температура в зоне испытания равнялась плюс 15 °С, воздух подавался через компрессор производительностью 150 м^3/мин. В качестве жидкости использовалась вода, подаваемая по водопроводу под давлением 3,5 атм. Эксперимент с каждым из хладагентов длился в течение 240 мин. В результате было установлено (рис. 6), что по прошествии 160 мин катушка без охлаждения нагрелась до 100 °С, при охлаждении воздухом за этот же период времени нагрелась до 69 °С и под действием жидкости температура в катушке практически не изменилась.

Через 240 мин от начала эксперимента температура в катушке без охлаждения поднялась до 120 °С, а при охлаждении воздухом за этот же период времени температура в катушке поднялась до 75 °С, т.е. в 2 раза меньше, что говорит о возможности использовать воздушное охлаждение для ЭММ, что особенно важно при низких температурах, когда воду применять проблематично.

В результате стендовых испытаний были получены следующие технические характеристики ЭММ (табл. 1).

На полигонных испытаниях электромагнитного молота проводилась проверка его работоспособности, возможности манипулирования как навесным оборудованием на стреле экскаватора и выполнения работ по скалыванию горной породы.

По параметрам, соответствующим техническим характеристикам ЭММ, был выбран колесный экскаватор марки HYUNDAI 210.

Техническая характеристика экскаватора марки HYUNDAI 210: рабочая масса — 20 500 кг; емкость ковша — 0,51 — 1,34 м^3; длина стрелы — 5,65 м; длина рукояти — 2,4 м; максимальная высота подъема — 6,9 м.

Для навески ЭММ на стрелу экскаватора был использован адаптер с параметрами, мм: расстояние между проушинами — 330; расстояние от нижней плоскости до отверстий под палец — 248; диаметр отверстий под палец — 70.

В качестве разрушаемого объекта использованы находящиеся на месте испытания негабаритные куски гранита с плотностью 2,6 т/м^3 и прочностью на сжатие до 300 МПа и объемом 0,4 — 0,6 м^3 и порфирита с объемом — 1,2 м^3, плотностью — 1,45 т/м^3 и прочностью на сжатие до 400 МПа.

На рис. 7 представлен общий вид колесного экскаватора марки HYUNDAI 210 с установленным на рукояти навесным оборудованием — электромагнитным молотом и разрушаемый объект.

Манипуляция электромагнитным молотом обеспечивалась силовыми гидроцилиндрами на стреле и рукояти экскаватора.

Работа электромагнитного молота осуществлялось посредством блока управления с тиристорным преобразователем через кабельную связь. Блок управления подключался к трехфазной электрической сети через автоматический выключатель с электрическим расцепителем типа ВА88-373Р 400 А35 кВт. Выпрямление переменного напряжения осуществлялось при помощи трех оптотиристорных модулей М01-250-12 с охладителями. Выпрямленное напряжение подавалось на силовые электромагниты через два управляемых оптотиристорных модуля М03-250-12 и регулировалось при помощи индукционных датчиков.

Величина тока, подаваемого на катушки электромагнитных приводов прямого и обратного хода, варьировалась при помощи регулятора напряжение ИР-2 от 100 А до 200 А.

При испытании ЭММ, навешанного на стрелу экскаватора, максимальная рабочая высота при контакте рабочего инструмента с породой составила 5 м, максимальный радиус действия ЭММ на стреле равнялся 5 м.

Рис. 7. Общий вид экскаватора с электромагнитным молотом

Fig. 7. General view of the excavator with the electromagnet hammer

Манипулирование ЭММ позволяло изменять направление действия рабочего инструмента в горизонтальной и вертикальной плоскостях в широком диапазоне. Сравнение опытного образца ЭММ с гидромолотами представлено в табл. 2.

Гидросистема гидравлических молотов с увеличением ударной мощности повышает вес молота, что требует подбор базовой машины по массе и гидросистеме. Способность у электромагнит-

Таблица 2

Сравнение технических характеристик импульсных молотов
Comparison of technical characteristics of pulse hammers

Наименование параметров	**Наименование молотов**				
	Гидромолоты среднего класса				**ЭММ**
	МТВ 215, Турция [22]	**МТВ 255, Турция [22]**	**Rammer S84, Швеция**	**Delta F-20S Корея**	**ИГД им. Д. Кунаева**
Энергия удара, Дж	4500	5500	6000	5300	3000 — 6000
Масса молота, кг	2200	2520	2900	1800	1800
Масса экскаватора, кг	25 000	29 000	35 000	18 000	19 000

ного молота варьировать энергией единичного удара в диапазоне от 3 до 6 кДж позволяет работать по разрушению породы в достаточно широком диапазоне их крепости.

Выводы

Опыт создания и результаты испытаний показали:

• конструктивно ЭММ прост в изготовлении, поскольку отсутствуют детали, выполняемые по высокому классу точности, нет жестких требований к посадкам, для изготовления деталей не требуется дефицитных материалов и специальной оснастки;

• по своим техническим показателям электромагнитный молот не уступает гидромолотам зарубежных фирм;

• электромагнитный молот может устойчиво работать при низких температурах и регулировать энергию единичного удара в широком диапазоне

• рациональная область применения электромагнитных молотов на горнодобывающих и строительных предприятиях в условиях резко-континентального климата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Митусов А. А.*, *Решетникова О. С.*, *Митусов П. Е.*, *Лагунова Ю. А.* Исследования гидромолота для дробления горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2016. — № 11. — С. 125—134.

2. *Шумаков В. И.* Разработка теории гидрорезания песчаников струями воды высокого давления // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2001. — № 3. — С. 200—202.

3. *Melamed Yu., Kiselev A., Gelfgat M., Dreesen D., James B.* Hydraulic hammer drilling technology: developments and capabilities // Journal of Energy Resources Technology. 2000. Vol. 122, No 1. Pp. 1—7.

4. *Tang J. R.*, *Lu Y. Y.*, *Ge Z. L.*, *Xia B. W.*, *Wang J. H.* Combined drilling of hard rock with abrasive water jet and mechanical bit to improve drilling efficiency // Journal of Mining and Safety Engineering. 2013. Vol. 30, No 4. Pp. 621—627.

5. *Jokiniemi H.* Hydraulic junttan pile driving hammer / Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (XIV ICSMFE). Hamburg, 6—12 September 1997. Pp. 1077—1080.

6. *Andersson H., Simonsson K., Hilding D.* Validation of a co-simulation approach for hydraulic percussion units applied to a hydraulic hammer // Advances in Engineering Software. 2018. Vol. 131. Pp. 103—115. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2018.12.001.

7. *Каркашадзе Г. Г.* Механическое разрушение горных пород. — М.: МГГУ, 2004. — 220 с.

8. *Berry P., Blengini G. A., Fabbri S., Tafaro V. A.* Safety in quarrying ornamental stones by using diamond wire / Mine Planning and Equipment Selection. Chapter 99. London, Routledge, 2000. Pp. 521—526. https://doi.org/10.1201/9780203747124.

9. *Dolipski M., Jaszczuk M., Cheluszka P.*, *Sobota P., Kusak E., Kurek M.* Dynamic model of a shearer`s cutting system / Mine Planning and Equipment Selection. Chapter 103. London, Routledge, 2000. Pp. 541—546. https://doi.org/10.1201/9780203747124.

10. *Deniz T., Shahab H.* Predicting performance of impact hammers from rock quality designation and compressive strength properties in various rock masses // Tunnelling and Underground Space Technology. 2016. Vol. 59. Pp. 38—47.

11. *Ocak I., Seker S. E., Rostami J.* Performance prediction of impact hammer using ensemble machine learning techniques // Tunnelling and Underground Space Technology. 2018. Vol. 80. Pp. 269—276.

12. *Холодняков Г. А.*, *Лигоцкий Д. Н.*, *Половинко А. В.* Схемы работы гидравлического экскаватора с подвесным гидромолотом в забое при первичной отбойке породы // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2012. — № 4. — С. 248—251.

13. *Бексалов Е. Б.*, *Абсаматов Э. Н.*, *Гарипов Ф. Р.*, *Дандыбаев М. Ж.*, *Бексалов И. Е.* Безвзрывная технология разрушения крепких пород на открытых работах и рекомендации по ее применению // Машиноведение. — 2008. — № 6. — С. 117—124.

14. *Lemos L. C., Silva J. J., Rocha Neto J. S.* Estimated impact force for an electromagnetic hammer // Journal of Physics Conference Series. 2018. Vol. 1044, No 1. Article 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/1044/1/012029.

15. *Tao Wu, Yiru Tang, Shengwen Tang, Yongbo Li, Wangyong He* Design and analysis of a new down-the-hole electromagnetic hammer driven by tube linear motor // IET Electric Power Applications. 2017. Vol. 11, No 9. Pp. 1556—1565.

16. *Yedygenov Ye. K., Lyashkov V.* Electromagnetic rock breaker for non-explosive rocks breaking / Proceedings of the 20th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES 2011). Almata, 2011. Pp. 1002—1012.

17. *Едыгенов Е. К.* Евразийский патент № 026610 Электромагнитный молот. 28.04.2017.

18. *Павлов В. Е.* Исследования режимов работы элекромагнитного молота // Вестник Иркутского государственного технического университета. — 2017. — Т. 21. — № 12. — С. 164—173.

19. *Мошкин В. И.*, *Угаров Г. Г.* Продолжительность включения линейного электромагнитного двигателя в приводе технологического оборудования // Вестник Курганского государственного университета. Технические науки. — 2016. — № 3(42). — С. 84—87.

20. *Скотников А. А.*, *Вяльцев Г. Б.* Исследование рабочего процесса электромагнитной машины ударного действия // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2014. — № 1—2. — С. 296—299.

21. *Шестаков И. Я.*, *Фисенко Е. Н.*, *Ремизов И. А.* Особенности работы электромагнитного молота // Сибирский журнал науки и технологий. — 2014. —№ 2(54). — С. 85—88.

22. *Модельный* ряд МТВ. Буклет. — Стамбул, 2015. — 15 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Mitusov A. A., Reshetnikova O. S., Mitusov P. E., Lagunova Yu. A. Studies of a hydraulic hammer for crushing rocks. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2016, no 11, pp. 125—134. [In Russ].

2. Shumakov V. I. Developing the theory of hydraulic cutting of sandstones with high pressure water jets. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2001, no 3, pp. 200—202.

3. Melamed Yu., Kiselev A., Gelfgat M., Dreesen D., James B. Hydraulic hammer drilling technology: developments and capabilities. *Journal of Energy Resources Technology*. 2000. Vol. 122, No 1. Pp. 1—7.

4. Tang J. R., Lu Y. Y., Ge Z. L., Xia B. W., Wang J. H. Combined drilling of hard rock with abrasive water jet and mechanical bit to improve drilling efficiency. *Journal of Mining and Safety Engineering*. 2013. Vol. 30, No 4. Pp. 621—627.

5. Jokiniemi H. Hydraulic junttan pile driving hammer. *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (XIV ICSMFE)*. Hamburg, 6—12 September 1997. Pp. 1077—1080.

6. Andersson H., Simonsson K., Hilding D. Validation of a co-simulation approach for hydraulic percussion units applied to a hydraulic hammer. *Advances in Engineering Software*. 2018. Vol. 131. Pp. 103—115. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2018.12.001.

7. Karkashadze G. G. *Mekhanicheskoe razrushenie gornykh porod* [Mechanical disintegration of rocks], Moscow, MGGU, 2004, 220 p.

8. Berry P., Blengini G. A., Fabbri S., Tafaro V. A. Safety in quarrying ornamental stones by using diamond wire. *Mine Planning and Equipment Selection*. Chapter 99. London, Routledge, 2000. Pp. 521—526. https:.doi.org/10.1201/9780203747124.

9. Dolipski M., Jaszczuk M., Cheluszka P., Sobota P., Kusak E., Kurek M. Dynamic model of a shearer`s cutting system. *Mine Planning and Equipment Selection*. Chapter 103. London, Routledge, 2000. Pp. 541—546. https:.doi.org/10.1201/9780203747124.

10. Deniz T., Shahab H. Predicting performance of impact hammers from rock quality designation and compressive strength properties in various rock masses. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2016. Vol. 59. Pp. 38 – 47.

11. Ocak I., Seker S. E., Rostami J. Performance prediction of impact hammer using ensemble machine learning techniques. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2018. Vol. 80. Pp. 269 – 276.

12. Kholodnyakov G.A., Ligotskiy D.N., Polovinko A.V. Flow charts of the hydraulic excavator with suspended hydraulic hammer in a face at primary blasting. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2012, no 4, pp. 248 – 251. [In Russ].

13. Beksalov E.B., Absamatov E.N., Garipov F.R., Dandybaev M.Zh., Beksalov I.E.Blastless technology of hard rock breaking at open-pit mining and recommendations on its application. *Mashinovedenie*. 2008, no 6, pp. 117 – 124. [In Russ].

14. Lemos L.C., Silva J.J., Rocha Neto J.S. Estimated impact force for an electromagnetic hammer. *Journal of Physics Conference Series*. 2018. Vol. 1044, No 1. Article 012029. DOI: 10.1088/1742-6596/1044/1/012029.

15. Tao Wu, Yiru Tang, Shengwen Tang, Yongbo Li, Wangyong He Design and analysis of a new down-the-hole electromagnetic hammer driven by tube linear motor. *IET Electric Power Applications*. 2017. Vol. 11, No 9. Pp. 1556 – 1565.

16. Yedygenov Ye.K., Lyashkov V. Electromagnetic rock breaker for non-explosive rocks breaking. *Proceedings of the 20th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES 2011)*. Almata, 2011. Pp. 1002 – 1012.

17. Yedygenov Ye.K. EAP Patent 026610. 28.04.2017.

18. Pavlov V.E. Studies of the operation modes of the electromagnetic hammer. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2017. Vol. 21, no 12, pp. 164 – 173. [In Russ].

19. Moshkin V.I., Ugarov G.G. The duration of the linear electromagnetic engine in the drive of technological equipment. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2016, no 3(42), pp. 84 – 87. [In Russ].

20. Skotnikov A.A., Vyal'tsev G.B. The research of the working process of an electromagnetic shock machine. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka*. 2014, no 1 – 2, pp. 296 – 299. [In Russ].

21. Shestakov I.Ya., Fisenko E.N., Remizov I.A. Features of the electromagnetic hammer. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologiy*. 2014, no 2(54), pp. 85 – 88. [In Russ].

22. MTB Model Series. Booklet. Istanbul, 2015, 15 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Едыгенов Ерик Казтаевич[1] – д-р техн. наук, академик АМР РК,
заведующий отделом Геотехника,
Васин Константин Андреевич[1] – старший научный сотрудник,
PhD студент Satbayev University, e-mail: kvas2500@mail.ru,
[1] Институт горного дела им. Д.А. Кунаева, Казахстан.
Для контактов: Васин К.А., e-mail: kvas2500@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ye.K. Yedygenov[1], Dr. Sci. (Eng.), Academician of AMR RK,
Head of the Department of Geotechnics,
K.A. Vasin[1], Senior Researcher; PhD Student, Satbayev University, e-mail: kvas2500@mail.ru,
[1] D.A. Kunayev Mining Institute, 050046, Almaty, Kazakhstan.
Corresponding author: K.A. Vasin, e-mail: kvas2500@mail.ru.

Получена редакцией 13.12.2019; получена после рецензии 30.01.2020; принята к печати 20.04.2020.
Received by the editors 13.12.2019; received after the review 30.01.2020; accepted for printing 20.04.2020.