МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТБОЙКИ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД ГИДРОМОНИТОРНОЙ СТРУЕЙ С ЭЖЕКТИРОВАНИЕМ ТВЕРДЫХ АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ

Н.А. Шкаруба¹, В.Е. Кисляков¹, П.В. Катышев¹

¹ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия, e-mail: nshkaruba@sfu-kras.ru

Аннотация: Для разработки россыпных месторождений, сложенных глинистыми вмещающими породами, наиболее целесообразно применение гидромониторной отбойки. Для увеличения ее производительности возможно применение различных конструктивных и технологических способов. В практике применения напорных потоков воды широко применяется эжектирование абразивов. На этом принципе основана, например, гидроабразивная резка различных материалов. Однако для гидроабразивной резки характерны небольшие диаметры струй, значительные напоры и малые расстояния до обрабатываемого объекта. В горном деле известно эжектирование воздуха в напорный поток в стволе гидромонитора, но данных об эжектировании твердых частиц не найдено. Исходя из этого целью исследования является определение эффективности применения эжектирования твердых абразивных частиц в напорный поток в стволе гидромонитора для разработки месторождений, сложенных вмещающими породами с высоким содержанием глин, при помощи экспериментов в масштабе 1:10 на специальном лабораторном стенде и составление математической модели на основе полученных данных. В результате экспериментов обнаружено увеличение производительности гидромониторной отбойки по горной массе в 4,8—7,4 раза. По полученным экспериментальным данным составлена математическая модель, позволяющая прогнозировать эффективность отбойки от применения эжектирования твердых абразивных частиц для изменяющихся диаметра насадки и угла между забоем и струей.

Ключевые слова: месторождение, гидромонитор, гидромониторная отбойка, глинистый массив, твердые абразивные частицы, производительность отбойки, эжектирование, сила воздействия струи, моделирование, математическая модель.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-35-90112.

Для цитирования: Шкаруба Н. А., Кисляков В. Е., Катышев П. В. Моделирование отбойки глинистых пород гидромониторной струей с эжектированием твердых абразивных частиц // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 10. – С. 79–89. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-79-89.

Modeling clay rock jetting with ejection of solid abrasive particles

N.A. Shkaruba¹, V.E. Kislyakov¹, P.V. Katyshev¹

¹ Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia, e-mail: nshkaruba@sfu-kras.ru

Abstract: The most expedient approach to development of placers enclosed in clay host rock is jetting. The jetting efficiency can be improved using various structural techniques and technologies.

© Н.А. Шкаруба, В.Е. Кисляков, П.В. Катышев. 2019.

The pressure flow practice widely involves ejection of abrasives. For instance, hydro-abrasive cutting is based on this principle. However, hydro-abrasive cutting features small diameters of jets, considerable pressure heads and tight spacing to a treated object. The use of air ejection in the pressure flow in the jet gun is known in mining, though there is no data on ejection of solid particles. Accordingly, this study aims to determine efficiency of ejection of solid abrasive particles in the pressure flow in the jet gun for development of rock mass with high content of clay through experimentation at a scale of 1: 10 on a special test bench and mathematical modeling using the test results. The experiments show the increase in the jetting efficiency by 4.8–7.4 times. The mathematical model constructed using the experimental data allow predicting efficiency of jetting with ejection of solid abrasive particles at varied diameters of jet nozzle and jet–face angles.

Key words: mineral deposit, jet gun, jetting, clay rock mass, solid abrasive particles, jetting efficiency, ejection, jet impact, modeling, mathematical model.

Acknowledgements: This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 19-35-90112.

For citation: Shkaruba N. A., Kislyakov V. E., Katyshev P. V. Modeling clay rock jetting with ejection of solid abrasive particles. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(10):79-89. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-79-89.

Введение

Для разработки россыпных месторождений, сложенных вмещающими породами со значительным содержанием глин, наиболее эффективно применение технологии отработки с применением гидромониторной отбойки.

Для увеличения эффективности работы этого оборудования известны различные технические и технологические способы: при помощи конструктивных изменений, например, применения насадок более совершенной формы, успокоителей потока воды в стволе гидромонитора различных конструкций, оптимизации и уменьшения потерь напора в гидромониторной установке, придания подвижности самоходным гидромониторам во время гидроотбойки [1–5]; технологически — при помощи различных предварительных операций, например, рыхления механическим или буровзрывным способом, водонасщения пород. Но эти мероприятия неизбежно приведут к увеличению себестоимости и времени отработки месторождения.

Наличие в напорной воде твердых частиц дает значительный положительный эффект — применение двухфазных напорных потоков широко известно. На

этом принципе основана гидроабразивная резка [6–9], широко применяемая в различных отраслях производства. Абразивы в инструментах гидроабразивной резки подаются в напорный поток воды посредством эжектирования.

В горном деле этот принцип предлагается применять в буровых машинах, совмещающая механическое и абразивное воздействие на горный массив [10–19].

В области изучения взаимодействия напорной струи с поверхностью горных пород известны исследования В.Г. Мерзлякова [10–13], S. Liu, X. Liu, J. Chen, M. Lin и др. [20–25], теорию разрушения различных материалов гидроабразивной струей исследовали такие ученые, как A.G. Evans, K. Faber, I. Finnie, J.J. Griffiths, H.Oweinah, M. Hashish, G.L. Sheldon, M. Hessling и другие.

Известны исследования [26], где для разрушения массива горных пород применена напорная струя гидромонитора с эжектированием в нее воздуха. Эффективность способа подтверждена натурными экспериментами — возможно повышение разрушающей способности гидромониторной струи на 25–30%.

Исследования воздействия двухфазного потока показаны в [14–19], где для

резания породного массива авторами предложено и испытано в лабораторных условиях эжектирование в напорный поток твердых абразивных частиц, показавшее свою значительную эффективность.

Сказанное выше показывает эффективность применения двухфазных потоков. Однако область применения полученных результатов ограничена применением весьма высоких напоров (давление от 10–70 до более 400 МПа), малых диаметров сопел (от 0,6–1,2 до 2–3 мм), незначительных расстояний до обрабатываемого объекта (не более 15–25 мм), струи, направленной вертикально вниз. Анализ разрушаемости производился для хрупких пород, свойства которых существенно отличаются от свойств глинистых пород. Между тем, большинство россыпных месторождений полезных ископаемых представлены вязкими глинистыми породами, механизм разрушения которых значительно отличается от механизма разрушения твердых (хрупких) пород.

Таким образом, известно существование значительного количества исследований в области эффективного взаимодействия напорной струи с массивом

горных пород, в том числе, с наличием в их составе твердых абразивных частиц, но исследований, результаты которых применимы для условий разрушения глинистых массивов гидромониторными струями с наличием в них твердых абразивных частиц, выявлено не было.

Целью проведения исследований является определение производительности гидромониторной отбойки от применения абразивной струи в результате эжектирования твердых абразивных частиц в гидромониторную струю и составление математической модели на основе полученных данных.

Материалы и методы

Эксперименты выполнены в масштабе 1:10 при помощи лабораторного стенда [27]. Для осуществления поставленной задачи разработана конструкция устройства для гидромониторной отбойки двухфазным напорным потоком [28], приведенная на рис. 1 и 2.

Эксперименты проводятся при помощи гидромонитора (рис. 1, 2) с насадками диаметром (d_n) 5,2 и 7,6 мм. Напор на насадке по условиям экспери-

Рис. 1. Гидромонитор с эжектором: 1 — подводящий трубопровод; 2 — основная задвижка; 3 — эжектирующее устройство; 4 — водовод; 5 — вентиль; 6 — камера смешивания; 7 — накопитель твердых абразивных частиц

Fig. 1. Hydromonitor with ejector: 1 — supply pipe; 2 — main valve; 3 — ejecting device; 4 — water conduit; 5 — valve; 6 — mixing chamber; 7 — solid abrasive particle storage

мента задан $H_0 = 5$ м. Величина разрежения в эжекторе при этом составляет $H_{\text{эж}} = -3,5$ м. Гидромонитор находится на расстоянии (L) 2,5 м от забоя. Плотность напорной воды принята $\rho = 1000$ кг/м³. Диаметр сопла эжектора d_c составляет 2,3 мм. В качестве твердых абразивных частиц в эксперименте применяются частицы средней крупностью $d_{\text{тч}}$, мм: 0,15; 0,20; 0,26; 0,33; 0,41.

Методика проведения экспериментов следующая (рис. 1): сначала через кран 5 подают воду на эжектор 3. Когда режима потока стабилизируется, измеряют величину разрежения с помощью вакуумметра 3 (рис. 2), затем подают основной поток на гидромонитор, используя кран 2, устанавливают необходимый напор на насадке гидромонитора, контролируя его манометром 2 (рис. 2). Заменяют вакуумметр 3 на бункер для твердых абразивных частиц 7.

Твердые абразивные частицы подаются в эжектор через загрузочное отверстие диаметром 7 мм. Навеску твердых абразивных частиц помещают в бункер 7 (рис. 1), измеряют время истечения навески песка. Одновременно за этот же период измеряют силу давления струи

на забой. Для определения количества горной массы, отбиваемой за время каждого опыта, образец горной массы взвешивают, устанавливают на место забоя, размывают, еще раз взвешивают, определяют разницу в весе — количество отбитой горной массы.

Так как предполагается эжектирование твердых частиц, для чистоты эксперимента размываемый образец выбран без примесей, он состоит только из глины. Материал образца — лонтоваские глины кембрия, так называемые «синие» или «голубые» глины, добываемые в Ленинградской области на Чкаловском месторождении с глубины порядка 80 м.

По физическим свойствам синие глины характеризуются как уплотненные и, как следствие, имеют сравнительно малую естественную влажность (около 16%); плотность глин 2,25 т/м³, пористость — порядка 30%, предел текучести при растяжении — 1,8 МПа, модуль Юнга — $4,4 \cdot 10^9$ Па, коэффициент Пуассона — 0,35, предел прочности при сжатии — 15,38 МПа.

По гранулометрическому составу синие глины классифицируются как глины пылеватые. Содержание глинистых фрак-

Рис. 2. Модель гидромонитора с эжектором: 1 — подводящий трубопровод; 2 — манометр; 3 — вакуумметр; 4 — ствол модели гидромонитора с насадкой; 5 — накопитель твердых абразивных частиц
Fig. 2. Hydromonitor model with ejector: 1 — supply pipe; 2 — pressure gauge; 3 — vacuum gauge; 4 — stem of the model of the jetting machine with a nozzle; 5 — storage of solid abrasive particles

Таблица 1

Результаты проведения экспериментов**The results of the experiments**

Диаметр насадки, d_n , мм	Размер твердых абразивных частиц, $d_{тп}$, мм	Отклонение производительности гидромонитора ΔQ , %					
		Угол между осью струи и забоем α , °					
		5	15	35	55	75	90
52	1,5	597,7	682,5	701,0	688,8	679,5	659,7
	2,0	625,5	710,3	728,8	716,6	707,3	687,5
	2,6	652,6	737,4	755,9	743,7	734,4	714,6
	3,3	669,3	754,1	772,6	760,4	751,1	731,3
	4,1	675,5	760,3	778,8	766,6	757,3	737,5
76	1,5	372,2	457,5	474,5	462,5	453,5	437,5
	2,0	386,6	471,9	488,9	476,9	467,9	451,9
	2,6	403,5	488,8	505,8	493,8	484,8	468,8
	3,3	411,6	496,9	513,9	501,9	492,9	476,9
	4,1	416,0	501,3	518,3	506,3	497,3	481,3

ций изменяется от 30 до 60%, пылеватых фракций — от 40 до 50%, песчаных фракций — нет.

По своему минеральному составу сине глины полиминеральны: в их составе обнаружено 18 минералов. В основном в их число входят легкие минералы, такие, как кварц (74%), полевошпат, хлорит, глауконит, слюда и др. Среди минералов тяжелой фракции глин встречаются пирит, турмалин, роговая обманка и некоторые другие. Тонкая фракция представлена типичными глинистыми минералами (в порядке преобладания) — гидрослюдой, каолинитом, монтмориллонитом. Таким образом, лонтоваские глины кембрия можно отнести к типу монтмориллонитово-гидрослюдистых.

Следует отметить, что такие грунты относятся к весьма трудноразмываемым.

Размер эжектируемых частиц обусловлен обеспечением эффективного действия и стабильного истечения струи из эжектора и принимается по общепринятым нормам порядка 10–30% диаметра выходного отверстия камеры смешивания эжектора.

В работе приняты твердые абразивные частицы неправильной формы плотностью $\gamma = 1,7 \text{ т/м}^3$ (кварцевый песок).

Результаты

Результаты экспериментов показаны в табл. 1 и на графиках (рис. 3, 4). Данные представлены с учетом масштаба. Проведенные исследования показали, что применение эжектирования твердых абразивных частиц в гидромониторную струю позволяет увеличить производительность отбойки от 4,8 до 7,4 раза при напоре 50 м и диаметрах насадки 76 и 52 мм соответственно.

Обсуждение

Из графиков рис. 3, 4 видно, что с увеличением размера твердых абразивных частиц производительность отбойки возрастает неравномерно. Большую интенсивность отклонения производительности можно наблюдать для частиц меньшего размера. С увеличением крупности твердых абразивных частиц кривая производительности на графиках рис. 3, 4 выполаживается.

Рис. 3. График отклонения производительности гидромониторной отбойки от размера твердых абразивных частиц при углах между осью струи и забоем 5–90° и диаметре насадки 52 мм

Fig. 3. Graph of the deviation of the performance of the jetting breaker from the size of solid abrasive particles at angles between the jet axis and the bottom of 5–90° and a nozzle diameter of 52 mm

Исследуя полученные графики, можно сделать вывод, что отклонение производительности гидромониторной отбойки зависит от размера твердых абразивных частиц и может быть определено по уравнению:

$$\Delta Q = (a \cdot d_{тч}^2 + b \cdot d_{тч} + C) \cdot 1,05, \%, \quad (1)$$

где a и b — эмпирические коэффициенты, зависящие от диаметра насадки гидромонитора (2, 3); $d_{тч}$ — размер твердых абразивных частиц, мм; C — эмпирический коэффициент, зависящий от диа-

Рис. 4. График отклонения производительности гидромониторной отбойки от размера твердых абразивных частиц при углах между осью струи и забоем 5–90° и диаметре насадки 76 мм

Fig. 4. Graph of the deviation of the performance of the jetting breaker from the size of solid abrasive particles at angles between the jet axis and the bottom 5–90° and a nozzle diameter of 76 mm

метра насадки гидромонитора и угла между осью струи и забоем (рис. 5).

Изменение коэффициентов a и b прослеживается по линейной зависимости:

$$a = 0,290 \cdot d_{\text{тч}} - 27,37, \quad (2)$$

$$b = -0,265 \cdot d_{\text{тч}} + 83,29. \quad (3)$$

Коэффициент C описывает интенсивность размыва при различных углах α между осью гидромониторной струи и забоем. При этом определено, что производительность размыва постепенно возрастает с увеличением угла α и достигает наибольшей эффективности при угле α порядка 35° . Затем следует снижение эффективности размыва. На графике (см. рис. 5) видно, что при разных диаметрах насадки эта закономерность описывается коэффициентом C .

Изменение эмпирического коэффициента C от угла между осью гидромониторной струи и забоем прослеживается по полиномиальной зависимости второго порядка и описывается уравнением

$$C = a_1 \cdot \alpha^2 + a_2 \cdot \alpha + a_3, \quad (4)$$

где α — угол между осью гидромониторной струи и забоем, $^\circ$; $a_1...a_3$ — эмпирические коэффициенты, зависящие от диаметра насадки гидромонитора и угла между осью гидромониторной струи и забоем (5).

$$a_1...a_3 = A \cdot d_n + B, \quad (5)$$

где A и B — эмпирические коэффициенты, зависящие от угла между осью гидромониторной струи и забоем, показанные в табл. 2.

Преобразуя уравнения (1)–(5), получим математическую модель изменения

Рис. 5. График зависимости коэффициента C от угла между осью струи и забоем (α): при диаметре насадки 52 мм и $\alpha \geq 19^\circ$ (а); при диаметре насадки 52 мм и $\alpha < 19^\circ$ (б); при диаметре насадки 76 мм и $\alpha \geq 19^\circ$ (в); при диаметре насадки 76 мм и $\alpha < 19^\circ$ (г)

Fig. 5. Graph of the coefficient C from the angle between the jet axis and the face (α): with a nozzle diameter of 52 mm and $\alpha \geq 19^\circ$ (a); with a nozzle diameter of 52 mm and $\alpha < 19^\circ$ (b); with a nozzle diameter of 76 mm and $\alpha \geq 19^\circ$ (c); with a nozzle diameter of 76 mm and $\alpha < 19^\circ$ (d)

Таблица 2

Эмпирические коэффициенты А и В
Empirical A and B coefficients

	$\alpha < 19^\circ$		$\alpha \geq 19^\circ$	
	А	В	А	В
a_1	-0,00025	-0,23850	0,00010	-0,01193
a_2	0,00700	13,16000	-0,01450	1,00108
a_3	-8,54620	839,71010	-8,22290	987,24477

интенсивности при гидромониторной отбойке с эжектированием в напорную струю твердых абразивных частиц

$$\Delta Q = ((0,290 \cdot d_n - 27,37) \cdot d_{тч}^2 + (-0,265 \cdot d_n + 83,29) \cdot d_{тч} + C) \cdot 1,05 \quad (6)$$

где коэффициент С зависит от угла между забоем и струей α :

$$C = (-0,00025 \cdot d_n - 0,23850) \cdot \alpha^2 + (0,00700 \cdot d_n + 13,16) \cdot \alpha + (-8,5462 \cdot d_n + 839,71010) \quad \text{при } \alpha < 19^\circ; \quad (7)$$

$$C = (0,00010 \cdot d_n - 0,01193) \cdot \alpha^2 + (-0,01450 \cdot d_n + 1,00108) \cdot \alpha + (-8,22290 \cdot d_n + 987,24477) \quad \text{при } \alpha \geq 19^\circ. \quad (8)$$

Полученная математическая модель позволяет прогнозировать влияние эжектирования твердых абразивных частиц на производительность гидромониторной отбойки с достаточной степенью достоверности. Погрешность составляет 5—10%.

Выводы

Эжектирование твердых абразивных частиц при гидромониторной разработке глинистых россыпных месторождений

практически возможно и достаточно эффективно.

Эжектирование твердых абразивных частиц в напорную воду посредством указанного устройства позволяет размывать грунты, относящиеся к трудноразмываемым, с меньшим, чем рекомендовано традиционной технологией, напором (в 2 и более раза), что, в свою очередь, ведет к сокращению расхода напорной воды и электроэнергии и, как следствие, увеличению экологичности отбойки.

Увеличение производительности гидромониторной отбойки по горной массе за счет эжектирования в напорный поток твердых абразивных частиц возможно в 4,8—7,4 раза.

Применение технологии наиболее эффективно при использовании системы разработки с попутным или боковым забоем при угле между забоем и гидромониторной струей 35° , но не исключает применение других систем разработки.

По результатам проведенных экспериментов предложена математическая модель, посредством применения которой возможно прогнозирование и анализ увеличения производительности гидромониторной отбойки от применения эжектирования твердых абразивных частиц для изменяющихся диаметра насадки и угла между забоем и струей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хныкин В. Ф. Разрушение горных пород гидромониторными струями на открытых разработках. — М.: Наука, 1969. — 150 с.
2. Савченко Н. В., Яхно О. М., Шкарабура Н. Г. Влияние параметров струеформирующих устройств на компактность струи // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. — 2006. — № 3. — 12 с.

3. Поклонов Д. А., Литвин Ю. И., Протасов С. И. Определение необходимых диаметров насадок гидромониторов с учетом режима работы насосной станции // Вестник Кузбасского государственного технического университета. — 2004. — № 3 (40). — 3 с.
4. Мизурев В. Ю. Теоретический анализ средств водоснабжения высоконапорных самоходных гидромониторов // Записки Горного института. — 2003. — Т. 155. Ч. 2. — 2 с.
5. Ялтанец И. М., Егоров В. К. Гидромеханизация: Справочный материал. — М.: МГГУ, 1999. — 338 с.
6. Астахов Ю. П., Королев А. Н., Жихарев М. Б., Волков С. М. Патент РФ № 2508189, 25.10.2012. Установка гидроабразивной резки. 2014. Бюл. № 6.
7. David R Pearl Patent DE 2813499A1, 7.10.1977. Fluidstrahl-vorrichtung zum schneiden von flachmaterial
8. Шпилев В. В., Решетников М. К., Капulyнник С. И., Береда Н. Н., Кутин А. С. Патент РФ № 2466008, 17.03.2011. Способ формирования струи жидкости для резания материалов и устройство для его реализации. 2012. Бюл. № 31.
9. Сазонов Д. Ю. Определение рациональных диапазонов изменения режимов гидроабразивного резания материалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2010. — № 2—2. — 7 с.
10. Мерзляков В. Г. Гидроструйные технологии в горном деле: основные результаты научно-исследовательских работ // Горное оборудование и электромеханика. — 2018. — № 2. — 5 с.
11. Мерзляков В. Г., Бафталовский В. Е., Бейдинов В. Н. Опыт применения гидравлических струй высокого давления при создании эффективных средств разрушения горных пород // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. — 2011. — № 4 (4). — 2 с.
12. Мерзляков В. Г., Бафталовский В. Е. Установление рациональных параметров, разработка и создание инструментов для гидроабразивного резания твердых материалов // Горное оборудование и электромеханика. — 2008. — № 4. — 4 с.
13. Мерзляков В. Г., Кузьмин И. А., Иванушкин И. В. Гидромеханическое разрушение горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 1999. — № 1. — 3 с.
14. Жабин А. Б., Поляков А. В., Сарычев В. И., Хачатурян В. Г. Разрушение горючих сланцев высокоскоростными струями воды // Горное оборудование и электромеханика. — 2017. — № 7. — 4 с.
15. Жабин А. Б., Аверин Е. А. Систематизация параметров процесса эрозии горных пород под действием гидроабразивных струй // Горное оборудование и электромеханика. — 2015. — № 4. — 3 с.
16. Аверин Е. А., Жабин А. Б., Поляков В. А., Щеголевский М. М. Анализ и доработка аналитического метода расчета гидроабразивной эрозии горных пород // Горное оборудование и электромеханика. — 2018. — № 2. — 8 с.
17. Жабин А. Б., Аверин Е. А. Простейший аналитический метод расчета эрозии горных пород под действием гидроабразивной струи // Горное оборудование и электромеханика. — 2015. — № 5. — 4 с.
18. Пушкарев А. Е., Головин К. А., Наумов Ю. Н. Выбор метода обоснования характеристик источников воды высокого давления / Проблемы разработки месторождений полезных ископаемых Центрального региона Российской Федерации: тезисы докладов 1-й Региональной конференции. — Тула, 1998. — С. 79.
19. Пушкарев А. Е., Жабин А. Б., Головин К. А. Исследование влияния расстояния от среза коллиматора гидроабразивного резака до поверхности разрушаемой породы на эффективность процесса щелеобразования / Наука и экологическое образование. Практика и перспективы: тезисы докладов 1-й международной конференции по проблемам экологии и безопасности жизнедеятельности. — Тула, 1997. — С. 189.
20. Liu S., Liu X., Chen J., Lin M. Rock breaking performance of a pick assisted by high-pressure water jet under different configuration modes // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 28. N. 3. Pp. 607—617. DOI: 10.3901/CJME.2015.0305.023.
21. Liu X., Liu S., Li L., Cui X. Experiment on conical pick cutting rock material assisted with front and rear water jet. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 9 p. DOI: 10.1155/2015/506579.
22. Liu S., Chen J., Liu X. Rock breaking by conical pick assisted with high pressure water jet. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 9 p. DOI: 10.1155/2014/868041.

23. Song D., Wang E., Liu Z., Liu X., Shen R. Numerical simulation of rock-burst relief and prevention by water-jet cutting // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2014, pp. 318–331. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.05.015.

24. Song D., Wang E., Xu J., Liu X., Shen R., Xu W. Numerical simulation of pressure relief in hard coal seam by water jet cutting // Geomechanics and Engineering, 2015, pp. 495–510. DOI: 10.12989/gae.2015.8.4.495.

25. Wen-tao L., Xiao-yu D. Study on flow field characteristics of nozzle water jet in hydraulic cutting / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017. DOI: 10.1088/1755-1315/81/1/012167.

26. Малухин Н. Г., Дробаденко В. П., Клочков Н. Н., Тимошенко С. В. Повышение эффективности работы гидромонитора ГМД-350 при добыче янтаросодержащих глин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2010. — № 12. — 5 с.

27. Кисляков В. Е., Шкаруба Н. А., Калмаков М. В., Росьянский Д. С., Килин Д. Е., Маргонов А. В., Трифонов Е. Н., Аксаментов Н. А. Патент РФ № 169574, 23.08.2016. Стенд для исследования интенсивности гидромониторной отбойки. 2017. Бюл. № 9.

28. Шкаруба Н. А., Кисляков В. Е., Нафиков Р. З. Заявка патент РФ № 2018147682, 28.12.2018. Гидромонитор. 2018. **ФИАС**

REFERENCES

1. Khnykin V. F. *Razrushenie gornykh porod gidromonitornymi struyami na otkrytykh razrabotkakh* [The destruction of rocks by jetting jets in open pit mining], Moscow, Nauka, 1969, 150 p.

2. Savchenko N. V., Yakhno O. M., Shkarabura N. G. Influence of parameters of jet-forming devices on jet compactness. *Protsesi mekhanichnoi obrobki v mashinobuduvanni*. 2006, no 3, 12 p.

3. Poklonov D. A., Litvin Yu. I., Protasov S. I. Determination of the required diameters of the nozzles of hydraulic monitors taking into account the operating mode of the pumping station. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2004, no 3 (40), 3 p. [In Russ].

4. Mizurev V. Yu. Theoretical analysis of the means of water collection of high-pressure self-propelled hydromonitors. *Zapiski Gornogo instituta*. 2003. Vol. 155, part 2, 2 p. [In Russ].

5. Yaltanets I. M., Egorov V. K. *Gidromekhanizatsiya: Spravochnyy material* [Hydromechanization: Reference material], Moscow, MGGU, 1999, 338 p.

6. Astakhov Yu. P., Korolev A. N., Zhikharev M. B., Volkov S. M. *Patent RU 2508189*, 25.10.2012.

7. David R. Pearl *Patent DE 2813499A1*, 7.10.1977. Fluidstrahl-vorrichtung zum schneiden von flachmaterial.

8. Shpilev V. V., Reshetnikov M. K., Kapul'nik S. I., Bereda N. N., Kutin A. S. *Patent RU 2466008*, 17.03.2011.

9. Sazonov D. Yu. Determination of rational ranges of change in the modes of hydroabrasive cutting of materials. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2010, no 2–2, 7 p. [In Russ].

10. Merzlyakov V. G. Hydrojet technologies in mining: the main results of scientific research. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2018, no 2, 5 p. [In Russ].

11. Merzlyakov V. G., Baftalovskiy V. E., Beydinov V. N. Experience in the use of high-pressure hydraulic jets in creating effective means of rock destruction. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo*. 2011, no 4 (4), 2 p. [In Russ].

12. Merzlyakov V. G., Baftalovskiy V. E. Establishment of rational parameters, development and creation of tools for hydroabrasive cutting of hard materials. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2008, no 4, 4 p. [In Russ].

13. Merzlyakov V. G., Kuz'min I. A., Ivanushkin I. V. Hydromechanical destruction of rocks. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 1999, no 1, 3 p. [In Russ].

14. Zhabin A. B., Polyakov A. V., Sarychev V. I., Khachatryan V. G. Destruction of combustible shales by high-speed water jets. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2017, no 7, 4 p. [In Russ].

15. Zhabin A. B., Averin E. A. Systematization of the parameters of the process of erosion of rocks under the action of hydro-abrasive jets. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2015, no 4, 3 p. [In Russ].

16. Averin E. A., Zhabin A. B., Polyakov V. A., Shchegolevskiy M. M. Analysis and refinement of the analytical method for calculating hydro-abrasive erosion of rocks. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2018, no 2, 8 p. [In Russ].

17. Zhabin A.B., Averin E.A. The simplest analytical method for calculating erosion of rocks under the action of a hydroabrasive jet. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2015, no 5, 4 p. [In Russ].

18. Pushkarev A.E., Golovin K.A., Naumov Yu.N. The choice of a method to substantiate the characteristics of high pressure water sources. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh Tsentral'nogo regiona Rossiyskoy Federatsii*. Abstracts of the 1st Regional conference. Tula, 1998, pp. 79. [In Russ].

19. Pushkarev A.E., Zhabin A.B., Golovin K.A. Study of the influence of the distance from the slice of the hydro-abrasive cutter collimator to the surface of the rock to be destroyed on the effectiveness of the gap formation process. *Nauka i ekologicheskoe obrazovanie. Praktika i perspektivy*. Abstracts of the 1st International conference on ecology and life safety. Tula, 1997, pp. 189. [In Russ].

20. Liu S., Liu X., Chen J., Lin M. Rock breaking performance of a pick assisted by high-pressure water jet under different configuration modes. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 28. No. 3. Pp. 607–617. DOI: 10.3901/CJME.2015.0305.023.

21. Liu X., Liu S., Li L., Cui X. Experiment on conical pick cutting rock material assisted with front and rear water jet. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 9 p. DOI: 10.1155/2015/506579.

22. Liu S., Chen J., Liu X. Rock breaking by conical pick assisted with high pressure water jet. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 9 p. DOI: 10.1155/2014/868041.

23. Song D., Wang E., Liu Z., Liu X., Shen R. Numerical simulation of rock-burst relief and prevention by water-jet cutting. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2014, pp. 318–331. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2014.05.015.

24. Song D., Wang E., Xu J., Liu X., Shen R., Xu W. Numerical simulation of pressure relief in hard coal seam by water jet cutting. *Geomechanics and Engineering*, 2015, pp. 495–510. DOI: 10.12989/gae.2015.8.4.495.

25. Wen-tao L., Xiao-yu D. Study on flow field characteristics of nozzle water jet in hydraulic cutting. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017. DOI: 10.1088/1755-1315/81/1/012167.

26. Malukhin N.G., Drobachenko V. P., Klochkov N.N., Timoshenko S.V. Improving the efficiency of the GMD-350 hydro-monitor when mining amber-bearing clay. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2010, no 12, 5 p. [In Russ].

27. Kislyakov V.E., Shkaruba N.A., Kalmakov M.V., Ros'yanskiy D.S., Kilin D.E., Margotnov A.V., Trifonov E.N., Aksamentov N.A. *Patent RU 169574*, 23.08.2016.

28. Shkaruba N.A., Kislyakov V.E., Nafikov R.Z. *Patent application RU 2018147682*, 28.12.2018.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шкаруба Наталья Александровна¹ — аспирантка,

e-mail: nshkaruba@sfu-kras.ru,

Кисляков Виктор Евгеньевич¹ — д-р техн. наук, профессор,

Катышев Павел Викторович¹ — канд. техн. наук, доцент,

¹ Сибирский федеральный университет.

Для контактов: Шкаруба Н.А., e-mail: nshkaruba@sfu-kras.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.A. Shkaruba¹, Graduate Student, e-mail: nshkaruba@sfu-kras.ru,

V.E. Kislyakov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

P.V. Katyshev¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

¹ Siberian Federal University, 660025, Krasnoyarsk, Russia.

Corresponding author: N.A. Shkaruba, e-mail: nshkaruba@sfu-kras.ru.