ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2021;(3):28-36
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.242.2:622.24.051.49 DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-28-36

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРУЖНОГО ПНЕВМОУДАРНИКА БУРОВОГО СТАНКА

Д.А. Юнгмейстер[1], А.И. Исаев[1], А.И. Ячейкин[1], П.Д. Соболева[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: Isaev_AI@pers.spmi.ru

Аннотация: В настоящее время на горнодобывающих предприятиях, где используют буровые станки, наблюдается недостаточная эффективность интенсификации процесса вращательного бурения. Поэтому предлагается дополнить процесс вращательного бурения ударными нагрузками путем установки погружного пневмоударника (ППУ) в буровой став станка шарошечного бурения, например, СБШ-250. Помимо этого, в погружном пневмоударнике дополнительно изменяется ударная система путем размещения между поршнем-ударником и буровым инструментом промежуточного элемента — бойка. Рассмотрены конструкции экспериментальных стендов, на одном из которых в несколько этапов проводились экспериментальные исследования с целью проверки предлагаемой конструкции ударника. Основная идея исследований заключалась в том, что увеличение энергии удара приведет к существенному повышению скорости бурения скажин. В рамках поставленной задачи были выполнены расчеты основных параметров погружного пневмоударника, а также произведен выбор материала бойка. Графически представлена зависимость скорости бурения от энергии наносимого удара. Выбор необходимых параметров производился с помощью экспериментального стенда. Усовершенствованная буровая система позволит увеличить скорость бурения скважин (производительность) в 2—2,4 раза, а также продлить срок службы рабочего инструмента, что, в свою очередь, позволит снизить себестоимость бурения.

Ключевые слова: карьерный буровой станок, погружной пневмоударник, шарошечное долото, удар, разрушение горной породы, скорость бурения, скважина, породоразрушающий инструмент.

Для цитирования: *Юнгмейстер Д.А., Исаев А.И., Ячейкин А.И., Соболева П.Д.* Экспериментальные исследования погружного пневмоударника бурового станка // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 3. – С. 28–36. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-28-36.

Field study of DTH hammer operation with rock drilling machines

D.A. Yungmeister[1], A.I. Isaev[1], A.I. Yacheikin[1], P.D. Soboleva[1]

[1] Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Isaev_AI@pers.spmi.ru

Abstract: Mining operations with rock drilling machines actually suffer from insufficient performance of rotary drilling. In this regard, it is proposed to equip drill columns of roller-bit drilling machines, e.g. SBSH-250, with DTH hammers. Furthermore, such DTH hammers are modified by means of installation of an intermediate element between a percussion piston and a drilling tool—a striker head. The article discusses designs of some test benches. One of such test benches was used for the staged field studies aimed to test the proposed design of a DTH hammer. The main idea was to increase the blow energy so that to speed up drilling. Within the set task, the basic variables of the DTH hammer were calculated, and the material was selected to manufacture the striker head. The graphical dependence of the drilling rate and the blow energy is presented. The wanted parameters are determined using the test bench. The improved rock drilling system can increase the drilling rate (drilling capacity) by 2–2.4 times and can extend the life of the rock-breaking tool, which, in its turn, can reduce the cost of drilling.

Key words: rock drilling machine, DTH hammer, roller bit, blow, rock fracture, drilling rate, drill hole, rock-breaking tool.

For citation: Yungmeister D.A., Isaev A.I., Yacheikin A.I., Soboleva P.D. Field study of DTH hammer operation with rock drilling machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(3):28-36. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-3-0-28-36.

Введение

Основные направления совершенствования станков СБШ-250 заключаются в повышении скорости бурения с помощью автоматизации контроля режимных параметров или использования различных технических средств интенсификации бурения и снижении вибрации бурового става и станка в целом [1–4].

Поэтому большой интерес представляет разработка технических средств, позволяющих повысить производительность отечественных станков шарошечного бурения при сохранении стойкости породоразрушающего инструмента и снижении вибрации бурового става.

Одним из самых существенных факторов, ограничивающих выбор режимов бурения, является вибрация бурового става и всего станка в целом. Основной причиной вредных вибраций, сопровождающих работу станков шарошечного бурения и уменьшающих срок службы его узлов, а также существенно осложняющих условия работы операторов станков, являются низкочастотные продольные колебания бурового става, которые возникают при работе шарошечного долота [1, 5–7].

Вибрация, возникающая при бурении станком СБШ, является не только одним из основных факторов, ограничивающих скорость бурения, но и негативно воздействует на человека [8, 9].

Для улучшения условий работы СБШ при бурении сложноструктурированных пород с перемежающимися твердыми и мягкими прослойками и повышения скорости бурения предлагается использовать погружные пневмоударники (ППУ), что позволяет решить следующие задачи:

- интенсификация внедрения штырей в породу для ее разрушения;
- обеспечение равномерности скола в отрабатываемой породе, вследствии чего улучшения прилегания долота к забою;
- снижение динамики става, повышение до максимума одновременности разрушения забоя штырями;
- снижение влияния на разрушение забоя наличия частиц штыба;
- повышение стойкости долота и оборудования.

Экспериментальный стенд для исследования макета ППУ

Одной из основных задач экспериментальных исследований является проверка работоспособности конструкции поршня с бойком, а также установле-

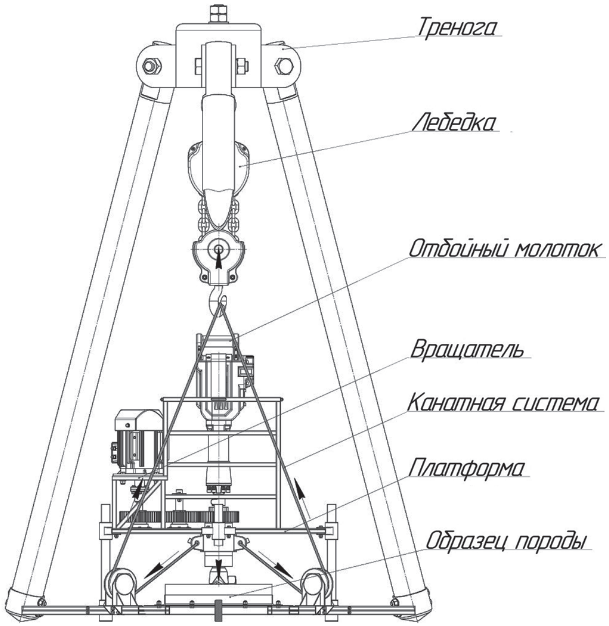

Рис. 1. Чертеж экспериментального стенда
Fig. 1. Test bench drawing

ние зависимости изменения скорости бурения от энергии наносимого удара.

Основной режимный параметр буровых станков, определяющий нагрузки и производительность, — скорость бурения, поэтому в методике лабораторных исследований используется именно этот параметр как основной показатель исследуемого процесса.

Для проведения экспериментальных исследований было разработано несколько вариантов экспериментального стенда. На рис. 1 изображен первый вариант экспериментального стенда, основными элементами которого являются тренога с закрепленной на ней лебедкой, отбойный молоток, вращатель, на выходе из которого установлена шарошка, платформа, канатная система. Особенностью работы представленного экспериментального стенда является способ создания требуемого осевого усилия. Поджатие шарошки к образцу породы осуществляется при помощи системы канатов и блоков, закрепленных к лебедке.

В ходе проведения экспериментальных исследований у стенда (рис. 1) были выявлены недостатки, связанные с необходимостью создания большого усилия на лебедке ввиду малых углов хода каната. Таким образом, для снижения усилия на лебедке необходимо увеличение длины треноги, что приводит к невозможности применения экспериментального стенда в условиях университетской лаборатории. Однако в дальнейшем стенд будет изготовлен и размещен в ангаре на учебно-научном полигоне для проведения студентами и аспирантами экспериментальных исследований.

В дальнейшем экспериментальные исследования по изучению воздействия ударной нагрузки на изменение скорости бурения проводились на экспериментальном стенде (рис. 2).

Для проведения экспериментальных исследований был разработан и изготов-

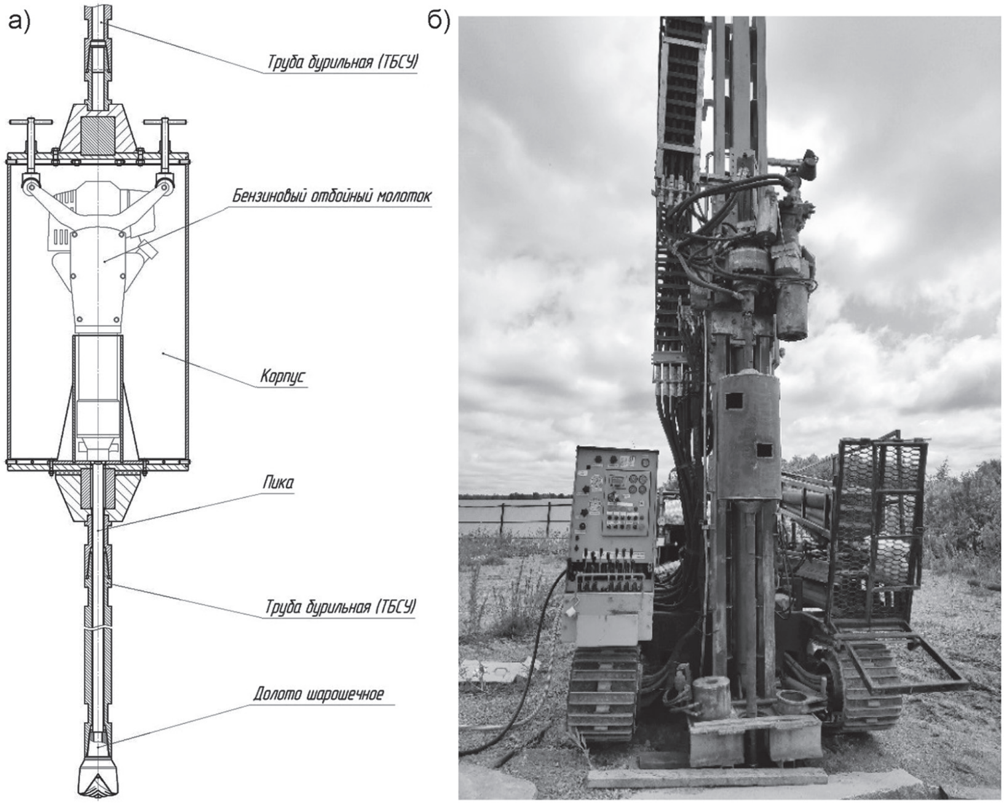

Рис. 2. Чертеж экспериментального стенда (а); общий вид экспериментального стенда (б)
Fig. 2. Test bench drawing (a); general view of test bench (b)

лен экспериментальный стенд (рис. 2), включающий бензиновый отбойный молоток, установленный в цилиндрическом металлическом корпусе, который, в свою очередь, в нижней части соединен бурильной трубой с трехшарошечным долотом, а в верхней соединен бурильной трубой с буровым станком. В качестве поршня для передачи ударной нагрузки от отбойного молотка на трехшарошечное долото используется пика.

Методика эксперимента включала:

1. Проведение исследований скорости бурения шарошкой без нанесения ударов при исследовании износа штырей шарошек;

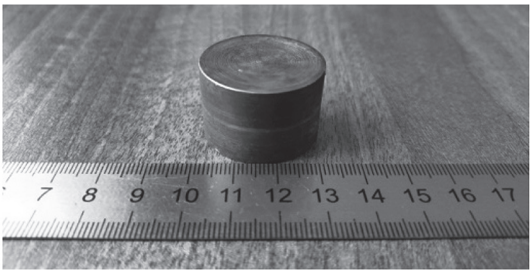

Рис. 3. Промежуточный элемент – боек
Fig. 3. Intermediate element – striker head

Характеристики составных частей шарошечного долота
Description of roller bit components

Деталь	Материал	Предел прочности, МПА
Шарошки	14ХН3МА	930
Лапа	15Н3МА	730
Ось	14Х17Н2	850
Шары, ролики	55СМ5ФА-ШД	1400

2. Проведение исследований скорости бурения шарошкой с нанесением ударов при исследовании износа штырей шарошек;

3. Проведение исследований скорости бурения шарошкой с нанесением ударов, с дополнительным промежуточным элементом при исследовании износа штырей шарошек.

Для выполнения 3 пункта методики проведения эксперимента была произведена доработка экспериментального стенда: в конструкцию переноса ударной нагрузки был добавлен промежуточный элемент — боек (рис. 3), который установили между пикой и трехшарошечным долотом. Боек изготовлен из конструкционной углеродистой стали марки 45, обладающей следующими прочностными характеристиками: предел прочности $\sigma_в$ = 600 МПа; $\sigma_Т$ = = 360 МПа; предел выносливости при растяжении-сжатии σ_{-1} = 240 МПа.

Расчет основных параметров

Чтобы оценить предлагаемое устройство (ППУ с бойком), необходимо было определить величину максимального осевого усилия в зависимости от условий работы станка. Расчет осевого усилия при использовании удара ППУ производился исходя из условий ниже приведенных условий.

Условие неразрушения частей шарошечного долота

Как известно, долото не является цельным элементом, поэтому оно состоит из различных основных деталей. Каждый элемент изготавливается из стали определенной марки, характеристики этих элементов приведены в таблице [10—12].

Для определения величины осевого усилия из условия неразрушения частей шарошечного долота при вращательно-ударном бурении с ППУ необходимо определить максимальное значение суммы сил, действующих на долото с учетом коэффициента запаса прочности и материала изготовления долота [13].

$$P_{\text{ос}\max} \le [\sigma_{сж}] \cdot \frac{S_i}{k_{\text{зап}}};$$

$$\left(P'_{\text{ос}} + P^{\text{П}}_{\text{ос}} + P^{\text{уд}}_{\text{ос}}\right) \le \frac{[\sigma_{\text{сж}}] S_i}{k_{\text{зап}}},$$

где S_i — опасное сечение в шарошке (S_1); в оси (S_2); в лапе (S_3); $[\sigma_{сж}]$ — предельное допустимое значение напряжения сжатия, определяется в зависимости от фактического металла, из которого изготавливается шарошка (опорный узел, лапа); $k_{зап}$ — коэффициент запаса прочности ($k_{зап}$ = 1,05 ÷ 1,3).

Для вычисления допустимой силы удара с целью неразрушения долота примем металл с минимальным пределом прочности и его площадью сечения в долоте, учитывая при этом коэффициент запаса прочности. Из таблицы видно, что минимальным пределом прочности обладает лапа долота. Тогда из условия неразрушения долота в опасном сечении (в лапе) можно составить неравенство для определения величины $P^{\text{уд}}_{\text{ос}}$:

$$P_{ос}^{уд} \le \frac{[\sigma_{сж}] \cdot S_з}{k_{зап}} - \left(P'_{ос} + P_{ос}^{П}\right).$$

Изменяя коэффициент запаса прочности, а также используя ранее рассчитанные величины, определим минимальное и максимальное значение осевого усилия при использовании удара ППУ.

При использовании шарошечного долота диаметром 75 мм, изготовленного из материала Сталь 12ХН2 для стендовых испытаний

$$P_{ос\,min}^{уд} \le \frac{730 \cdot 500}{1,3} - \left(4,9 \cdot 10^3 + 30 \cdot 10^3\right);$$

$$P_{ос\,min}^{уд} \le 245,8 \quad кН;$$

$$P_{ос\,max}^{уд} \le \frac{730 \cdot 500}{1,05} - \left(4,9 \cdot 10^3 + 30 \cdot 10^3\right);$$

$$P_{ос\,max}^{уд} \le 312,7 \quad кН.$$

Тогда:

$$P_{ос\,max} = P'_{ос} + P_{ос}^{П} + P_{ос}^{уд} =$$

$$= 4,9 + 30 + (245,8 \div 312,7) = 280,7 \div 347,6 \quad кН.$$

Условие сохранения ударного импульса

Зная массу и скорость поршня-ударника из характеристик стандартного ППУ М-48, можно найти осевое усилие. По условию сохранения импульса:

$$m_п \cdot \upsilon_п = P_{ос}^{уд} \cdot \tau,$$

где $m_п$ — масса поршня, $m_п \approx 5$ кг в стандартном ППУ М-48; $\upsilon_п$ — скорость поршня, $\upsilon_п \approx 3,94$ м/с; τ — время соударения, $\tau \approx 0,001$ с.

Усилие от удара при использовании стандартного ППУ будет найдено по формуле:

$$P_{ос}^{уд} = \frac{m_п \cdot \upsilon_п}{\tau} = \frac{5 \cdot 3,94}{0,001} \approx 20 \quad кН.$$

Таким образом, была рассчитана допустимая критическая ударная нагрузка на буровой инструмент, значение которой необходимо для проведения экспериментальных исследований.

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились на учебно-научном полигоне. В качестве привода вращения применялся буровой станок Geomachine Oy. Во время проведения экспериментальных исследований в 4 режимах бурения (номинальный режим; режим с нанесением мощного удара штатным гидроударником бурового станка; режим с нанесением удара встроенным в конструкцию отбойным молотком; режим с установленным в конструкцию промежуточным элементом) параметры режима бурения, влияющие на скорость бурения, были неизменны: осевое усилие $P_{ос}$ = 4 т; частота вращения ω = 1 $с^{-1}$; время бурения t = 120 с. Таким образом, на скорость бурения влияли только энергия наносимого удара и установленный в конструкцию экспериментального стенда промежуточный элемент.

В ходе проведения экспериментальных исследований были получены следующие значения скоростей бурения:

- в номинальном режиме скорость бурения составила 0,25 мм/с (30 мм за 120 с);
- в режиме с нанесением мощного удара встроенным (штатным) гидроударником бурового станка скорость бурения составила 1,88 мм/с (225 мм за 120 с);
- в режиме с нанесением удара встроенным в конструкцию отбойным молотком TSS-GJH95 (рис. 2), энергия которого равна 50 Дж, скорость бурения составила 0,5 мм/с;
- во время проведения этапа экспериментальных исследований с промежуточным элементом скорость бурения составила 0,6 мм/с при наложении ударной нагрузке, равной 50 Дж.

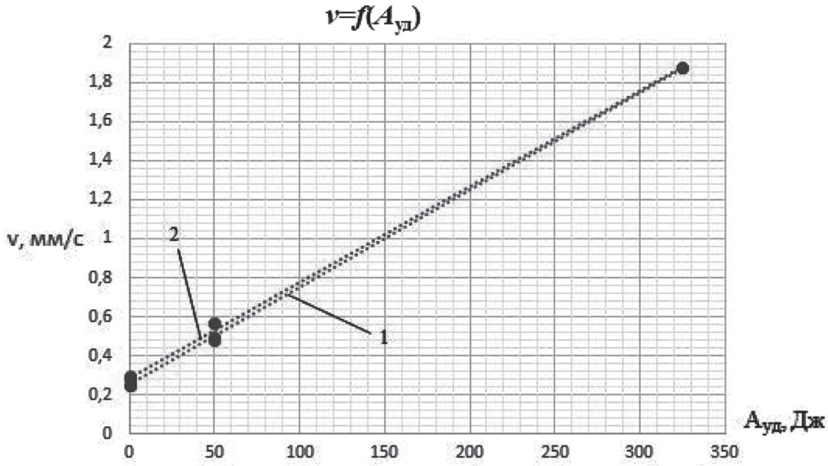

Рис. 4. Зависимость скорости бурения от энергии наносимого удара: 1 – график зависимости без добавления промежуточного элемента; 2 – график зависимости с добавлением промежуточного элемента (бойка)

Fig. 4. Drilling rate versus blow energy: 1 — without intermediate element; 2 — with intermediate element (striker head)

По результатам полученных данных был построен график скорости бурения в зависимости от энергии удара (рис. 4).

В ходе испытаний было отмечено:

1. Установка бойка позволила повысить скорость бурения на 6 %;

2. Устройство показало устойчивый режим работы;

3. Скорость бурения без нанесения удара изменялась в диапазоне от 15 до 18 мм/мин, а скорость бурения с нанесением удара по шарошечному долоту изменялась в диапазоне от 20 до 34 мм/мин.

При нанесении мощного удара по шарошке в течение продолжительного времени гарантированно происходит существенное снижение стойкости (срока службы) шарошки, поэтому требуется продолжение проведения экспериментальных исследований при использовании пневмоударника с регулируемой энергией удара, при этом дополнительно потребуется:

- уточнение величины энергии удара (менее 40 Дж);
- проведение ресурсных испытаний.

Заключение

В настоящее время перспективным направлением в области шарошечного бурения может быть наложение ударных нагрузок на вращающееся шарошечное долото. Самым надежным способом реализации ударных нагрузок может быть использование пневматических погружных пневмоударников. Кроме того, использование сдвоенных ударных систем с промежуточным бойком позволит дополнительно усовершенствовать процесс ударно-вращательного бурения.

В ходе эксперимента были установлены зависимости изменения скорости бурения от энергии наносимого удара, которые показали увеличение до 2 раз скорости бурения при наложении ударной нагрузке и до 2,4 раза — скорости бурения при наложении ударной нагрузки с промежуточным элементом по сравнению с номинальным.

Экспериментальные исследования показали работоспособность конструкции с поршнем и бойком, что дает возможность ее дальнейшего применения на буровых станках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лукашов К.А.* Обоснование рациональных режимов работы станка шарошечного бурения с наддолотным ударником для условий ОАО «Апатит»: дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.05.06. — СПб.: СПГГИ (ТУ), 2004. — 131 с.

2. *Юнгмейстер Д.А., Горшков Л.К., Пивнев В.А. Судьенков Ю.В.* Модернизация ударных буровых механизмов. — СПб.: Политехника-сервис, 2012. — 149 с.

3. *Заляев М.Ф.* Исследование вибрации при бурении скважин на термокарстовом газоконденсатном месторождении // Нефтегазовое дело. — 2015. — № 4. — т. 13. — С. 36—40.

4. *Wu D., Yin K., Gan X., Zhang X., Yin Q.* Strength analysis of new kinds of RC drill bit and its experimental study // Journal of Jilin University (Earth Science Edition). 2017. Vol. 47. No 1. Pp. 197—202. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.201701206.

5. *Vardhan A., Kumar A., Dasgupta K.* Effect of various parameters on the performance of the blasthole drilling // Journal of Mines, Metals and Fuels. 2017. Vol. 65. No 2. Pp. 49—54.

6. *Sun Y., Shi Y., Wang Q., Yao Z.* Study on speed characteristics of hydraulic top drive under fluctuating load // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2018. Vol. 167. Pp. 277—286. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.04.003.

7. *Gabov V.V., Zadkov D.A., Nguyen Khac Linh.* Features of elementary burst formation during cutting coals and isotropic materials with reference cutting tool of mining machines // Journal of Mining Institute. 2019. Vol. 236. Pp. 153—161. DOI: 10.31897/pmi.2019.2.153.

8. *Сабитов А.Э., Исаев А.И., Юнгмейстер Д.А., Уразбахтин Р.Ю.* Обоснование компоновки и параметров перфораторов-ударников для исполнительных органов проходческих комбайнов // Горное оборудование и электромеханика. — 2016. — №4. — С. 17—22.

9. *Сухов Р.И., Болкисев В.С., Реготунов А.С.* Выбор направлений совершенствования отечественной буровой техники для проходки взрывных скважин // Горное оборудование и электромеханика. — 2014. — № 5. — С. 46—48.

10. *Иванов К.И., Латышев В.А., Андреев В.Д.* Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. 3-е изд. — М.: Недра, 1987. — 272 с.

11. *Хруцкий А.А., Ощепков В.С.* Компьютерное моделирование рабочего процесса погружного пневмоударника П-110 // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 7. — С. 131—138. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-131-138.

12. *Vardhan A., Kumar A., Dasgupta K.* Effect of various parameters on the performance of the blasthole drilling // Journal of Mines, Metals and Fuels. 2017. Vol. 65. No 2. Pp. 49—54.

13. *Подэрни Р.Ю.* Механическое оборудование карьеров: Учебник для вузов, 8-е изд. — М.: Изд-во «Майнинг Медиа Групп», 2013. — 593 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Lukashov K.A. *Obosnovanie ratsional'nykh rezhimov raboty stanka sharoshechnogo bureniya s naddolotnym udarnikom dlya usloviy OAO «Apatit»* [Rationale for rational modes of operation of a roller drilling machine with a super-hammer drummer for the conditions of JSC «Apatit»], Candidate's thesis, Saint-Petersburg SPGGI (TU), 2004, 131 p.

2. Yungmeyster D.A., Gorshkov L.K., Pivnev V.A. Sud'enkov Yu.V. *Modernizatsiya udarnykh burovykh mekhanizmov* [Modernization of impact drilling mechanisms], Saint-Petersburg, Politekhnika-servis, 2012, 149 p.

3. Zalyaev M.F. investigation of vibration during well drilling at a thermokarst gas condensate field. *Neftegazovoe delo*. 2015, no 4, vol. 13, pp. 36—40. [In Russ].

4. Wu D., Yin K., Gan X., Zhang X., Yin Q. Strength analysis of new kinds of RC drill bit and its experimental study. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*. 2017. Vol. 47. No 1. Pp. 197—202. DOI: 10.13278/j.cnki.jjuese.201701206.

5. Vardhan A., Kumar A., Dasgupta K. Effect of various parameters on the performance of the blasthole drilling. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2017. Vol. 65. No 2. Pp. 49—54.

6. Sun Y., Shi Y., Wang Q., Yao Z. Study on speed characteristics of hydraulic top drive under fluctuating load. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2018. Vol. 167. Pp. 277—286. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.04.003.

7. Gabov V. V., Zadkov D. A., Nguyen Khac Linh. Features of elementary burst formation during cutting coals and isotropic materials with reference cutting tool of mining machines. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 236. Pp. 153—161. DOI: 10.31897/pmi.2019.2.153.

8. Sabitov A. E., Isaev A. I., Yungmeister D. A., Urazbakhtin R. Yu. Justification of the layout and parameters of hammer drills for executive bodies of tunneling combines. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2016, no 4, pp. 17—22. [In Russ].

9. Sukhov R. I., bolkisev V. S., Regotunov A. S. the Choice of directions for improving domestic drilling equipment for blasting wells. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2014, no 5, pp. 46—48. [In Russ].

10. Ivanov K. I., Latyshev V. A., Andreev V. D. *Tekhnika bureniya pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh*. 3-e izd. [Drilling techniques in the development of mineral deposits. 3rd edition], Moscow, Nedra, 1987, 272 p.

11. Khrutskiy A. A., Oshchepkov V. S. Computer modeling of DTH hammer P-110 operation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no 7, pp. 131—138. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-131-138.

12. Vardhan A., Kumar A., Dasgupta K. Effect of various parameters on the performance of the blasthole drilling. *Journal of Mines, Metals and Fuels*. 2017. Vol. 65. No 2. Pp. 49—54.

13. Poderni R. Yu. *Mekhanicheskoe oborudovanie kar'erov*: Uchebnik dlya vuzov, 8-e izd. [Mechanical equipment quarries: a Textbook for universities, 8th edition], Moscow, Izd-vo «Mayning Media Grupp», 2013, 593 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Юнгмейстер Дмитрий Алексеевич[1] — д-р техн. наук, профессор,
Исаев Алексей Игоревич[1] — канд. техн. наук, доцент,
e-mail: Isaev_AI@pers.spmi.ru,
Ячейкин Алексей Игоревич[1] — аспирант,
Соболева Полина Дмитриевна[1] — аспирант,
[1] Санкт-Петербургский горный университет.
Для контактов: Исаев А.И., e-mail: Isaev_AI@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

D.A. Yungmeister[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
A.I. Isaev[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: Isaev_AI@pers.spmi.ru,
A.I. Yacheikin[1], Graduate Student,
P.D. Soboleva[1], Graduate Student,
[1] Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: A.I. Isaev, e-mail: Isaev_AI@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 26.01.2020; получена после рецензии 22.12.2020; принята к печати 10.02.2021.
Received by the editors 26.01.2020; received after the review 22.12.2020; accepted for printing 10.02.2021.