

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН НА КАРЬЕРАХ АО «ЕВРАЗ КГОК» СТАНКАМИ ПНЕВМОУДАРНОГО БУРЕНИЯ

А.В. Яковлев¹, Е.С. Шимкив¹, Т.М. Переход¹

¹ Институт горного дела Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия,
e-mail: lubk_igd@mail.ru

Аннотация: Рассмотрена проблема изменения скорости бурения и стойкости буровых коронок на различных участках карьерного поля и при освоении новых залежей в сходных горно-геологических условиях. Приведены результаты хронометражных исследований процесса бурения технологических скважин на карьерах АО «ЕВРАЗ КГОК» станками пневмо-ударного бурения. Показано уменьшение скорости бурения и увеличение износа буровых коронок на карьере Собственно-Качканарского месторождения по сравнению с Главным карьером. Для обоснования условий производства буровых работ проведен сравнительный анализ горно-геологических характеристик, строения массива, минералогического состава и механических свойств горных пород Собственно-Качканарского и Гусевоторского месторождений. Установлены основные факторы, влияющие на уменьшение скорости бурения технологических скважин станками пневмоударного бурения и снижение износостойкости буровых коронок на карьере Собственно-Качканарского месторождения (СКМ). Главным фактором, вызывающим уменьшение скорости бурения на карьере СКМ по сравнению со скоростью бурения на Главном карьере, является меньшая степень трещиноватости массива, далее по степени значимости следуют такие факторы, как неоднородность (разнообразие) минералогического состава на Главном карьере и преобладание мелкозернистых пироксенитов на карьере СКМ с более высоким коэффициентом истираемости и повышенным содержанием Fe, V₂O₅ и TiO₂ по сравнению с Главным карьером. Результаты проведенных исследований позволяют обосновать производительность станков пневмоударного бурения и нормировать потребность в буровых коронках.

Ключевые слова: карьер, пневмоударное бурение, буримость, скорость бурения, хронометраж, горно-геологические условия, минералогический состав пород, структура массива, зернистость, трещиноватость.

Благодарность: Статья подготовлена при выполнении Госзадания № 075-00412-22 ПР. Тема 1 (2022-2024). Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. № 1021062010531-8-1.5.1.

Для цитирования: Яковлев А. В., Шимкив Е. С., Переход Т. М. Исследование процесса бурения технологических скважин на карьерах АО «ЕВРАЗ КГОК» станками пневмоударного бурения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 5. – С. 121-130. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_121.

Process borehole drilling using air-percussion drill rigs in open pit mines of EVRAZ KGOK

A.V. Yakovlev¹, E.S. Shimkiv¹, T.M. Perekhod¹

¹ Institute of Mining, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia,
e-mail: lubk_igd@mail.ru

Abstract: The article discusses the problem connected with different drilling rates and drill bit lives in different areas of open pit mine fields or in deposits having similar geological conditions. The time-studies of process borehole drilling using air-percussion drill rigs in open pit mines of EVRAZ KGOK are presented. It is shown that drilling rate is lower while drill bit wear is higher in open pit at Sobstvenno-Kachkanar deposit (SKD) than in Glavny open pit. For feasibility study of drilling conditions, the comparative analysis of geology, structure, mineralogy and mechanical properties of rock mass at SKD and Gusevogorskoe deposit is performed. The main factors which decrease air-percussion drilling rate and reduce drill bit wear resistance in SKD open pit are determined. The main cause of decrease in the drilling rate in SKD open pit as compared with the drilling rate in Glavny open pit is the lower level of jointing in rock mass. The rest influences are ranked according to their significance as: nonuniformity (diversity) of mineralogical composition in Glavny open pit and dominance of fine-grained pyroxenite in SKD open pit, with higher abrasion strength and higher content of Fe, V₂O₅ and TiO₂ as against Glavny open pit. The research results allow justifying capacity of air-percussion drill rigs and rating requirement of drill bits.

Key words: open pit mine, air-percussion drilling, drillability, drilling rate, time-study, geological conditions, mineralogical composition, rock mass structure, graininess, jointing.

Acknowledgements: The study was carried out under State Contract No. 075-00412-22 PR. Topic 1 (2022-2024): Methodology of the Integrated Solid Mineral Mining Strategy in the Geotechnology Development Dynamics (FUWE-2022-0005), Registration No. 1021062010531-8-1.5.1.

For citation: Yakovlev A. V., Shimkiv E. S., Perekhod T. M. Process borehole drilling using air-percussion drill rigs in open pit mines of EVRAZ KGOK. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;(5):121-130. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_5_0_121.

Введение

При производстве буровых работ на карьерах существует проблема изменения скорости бурения и стойкости буровых долот (коронки) на различных участках карьерного поля и при освоении новых залежей в сходных горно-геологических условиях.

Такая проблема возникла на АО «ЕВРАЗ КГОК» в связи с началом ведения горных работ на Собственно-Качканарском месторождении (СКМ), расположенном вблизи Гусевогорского ме-

сторождения, которое разрабатывается четырьмя карьерами. Оба месторождения представлены преимущественно пироксенитовым массивом, однако производительность станков пневмоударного бурения DML (Atlas Copco) и стойкость буровых коронок на карьере СКМ оказались существенно меньше, чем на Главном карьере в районе Промежуточной залежи Гусевогорского месторождения.

Цель исследований — установление причин изменения производительности

станков пневмоударного бурения при освоении Собственно-Качканарского месторождения в сравнении с Гусевогорским месторождением.

Буримость является одной из важных характеристик горных пород, определяющих способность сопротивляться проникновению в породы бурового инструмента. Она зависит от минерального состава, структуры и текстуры горных пород, а также от вида бурового инструмента, характера развиваемых сжимающих и скалывающих усилий, энергетических затрат на разрушение пород и др.

Структура горных пород — это совокупность признаков, описывающих степень связи между частицами породы, их размеры, форму и взаимное расположение. Структура в основном определяется степенью зернистости и размером зерен. Для одной и той же породы, но состоящей из зерен различной крупности, с уменьшением их размера прочностные показатели возрастают, что связано не только с качеством кристалла, но и с межмолекулярными связями в агрегатах и между отдельными минералами.

Текстура горных пород — это сложение породы, то есть, каким образом отдельные зерна уложены в массиве. По этому признаку текстуры могут быть: плотные, пористые, слоистые, рыхлые и т.п.

Также буримость зависит от таких параметров, как плотность, прочность, вязкость, твердость, абразивность, истираемость горных пород. Основным показателем буримости принята механическая скорость бурения. По этому критерию разработаны многочисленные отраслевые классификации, в том числе на отдельных предприятиях, и шкалы буримости применительно к различным способам бурения.

Изучению процессов разрушения горных пород при бурении скважин посвящены многочисленные исследования,

которые не привели к общему представлению о механизмах разрушения горной породы при ударном и ударно-вращательном бурении, о качественном и количественном влиянии отдельных факторов на характер протекающих процессов, поскольку на разрушение горных пород влияет совокупность природных, технических и технологических факторов (размер инструмента, энергия удара, частота ударов и т.д.) [1].

Исследования процесса бурения скважин проводятся в целях повышения эффективности взаимодействия бурового инструмента с породами в забое скважины [2 — 6], в том числе в направлении совершенствования конструкции буровых долот (коронки) [7 — 10].

Научная значимость исследований заключается в обосновании наиболее существенных горно-геологических факторов, влияющих на процесс бурения.

Практическая значимость работы состоит в повышении надежности принятия решений при нормировании труда рабочих, оценке производительности бурения, выборе породоразрушающего инструмента, количества буровых станков, обосновании потребности в материалах, буровых коронках, планировании и организации буровых работ в конкретных горно-геологических условиях [11].

Методология исследования заключается в сравнительных хронометражных наблюдениях механической скорости бурения на экспериментальных участках, анализе горно-геологических условий производства буровых работ и оценке значимости факторов, влияющих на процесс бурения.

Методы

Для обоснования условий производства буровых работ выполнен сравнительный анализ горно-геологических характеристик массива горных пород Собственно-Качканарского и Гусевогор-

ского месторождений на участках хронометража работы станков пневмоударного бурения, который проведен с целью определения технической скорости бурения в различных горно-геологических условиях.

Для определения буримости пород необходимо производить бурение новым долотом (коронкой) при заданных величинах осевого усилия, частоты вращения, давления сжатого воздуха, глубины бурения и т.п. На основании массовых определений в различных условиях карьерного поля устанавливаются разновидности горных пород по буримости.

Хронометраж начинается после того, как будут пробурены первые метры скважины (зона разрушения от взрывов

вышележащего уступа). По итогам хронометража определяются среднеарифметические затраты времени на бурение 1 м скважины или скорость бурения.

Экспериментальные исследования скорости бурения скважин

Хронометраж показателей работы станка пневмоударного бурения DML проведен на карьере СКМ на различных участках взрывного блока при обурировании уступа высотой 15 м в отметках 580 – 595 м.

Секундомером фиксировалось только «чистое» время бурения. Процесс бурения первых метров скважины по массиву, разрушенному при взрывании вышележащего уступа, с периодическим

Таблица 1

Результаты хронометража на карьере СКМ Time-studies in open pit mine at Sobstvenno-Kachkanar deposit

№ скважины	Интервал глубины скважины, м	Время бурения, мин – с	Скорость бурения, м/ч	Средневзвешенная скорость бурения, м/ч
1	3 – 9	15 – 01	24,0	24,6
	9 – 18	21 – 35	25,0	
2	5 – 9	12 – 12	19,7	23,0
	9 – 18	22 – 02	24,5	
3	4 – 9	26 – 45	11,2	16,3
	9 – 18	28 – 10	19,2	
4	2,5 – 9	15 – 15	25,6	28,5
	9 – 18	17 – 38	30,6	
5	3 – 9	12 – 08	29,7	26,6
	9 – 18	22 – 01	24,5	
6	4 – 9	17 – 58	16,7	21,9
	9 – 18	21 – 44	24,8	
7	5 – 9	11 – 02	21,8	24,5
	9 – 18	20 – 48	25,8	
8	1,5 – 9	13 – 36	33,3	28,3
	9 – 18	22 – 18	24,2	
9	2 – 9	13 – 23	31,6	27,4
	9 – 18	22 – 26	24,2	

Таблица 2

Результаты хронометража на Главном карьере
Time-studies in Glavny open pit mine

№ скважины	Интервал глубины скважины, м	Время бурения, мин—с	Скорость бурения, м/ч	Средневзвешенная скорость бурения, м/ч
1	3—10,7	13—27	34,3	27,5
	10,7—19	23—35	21,1	
2	3—10,7	15—48	29,2	27,6
	10,7—19	19—00	26,2	
3	3—10,7	18—45	24,6	24,1
	10,7—19	21—00	23,7	
4	4—10,7	13—51	28,7	27,3
	10,7—19	19—07	26,1	
5	3—10,7	15—30	28,0	28,3
	10,7—19	17—30	28,5	
6	4—10,7	10—09	39,8	34,5
	10,7—19	16—28	30,2	

подъемом бурового става из результатов определения технической скорости бурения был исключен.

Режим бурения: давление воздуха — 19—21 АТМ; скорость вращения бурового става — 35—40 об/мин.

Буровая коронка — ND882 Ø238 мм. Пневмоударник — ND882 Hammer.

Результаты хронометража представлены в табл. 1.

Средняя скорость бурения по девяти скважинам на карьере СКМ составила 24,6 м/ч.

Для сравнения скорости бурения в различных условиях были проведены хронометражные наблюдения на Главном карьере в районе Промежуточной залежи при бурении шести скважин на уступе высотой 15 м в отметках 205—220 м (табл. 2).

Средняя скорость бурения по шести скважинам составила 28,2 м/ч, что на 14,6% больше, чем при бурении девяти скважин на карьере СКМ.

Анализ скорости бурения первых 3—4 м скважин по массиву, разрушенному

взрывами на вышележащих горизонтах, показал, что на Главном карьере она составляет 60 м/ч, что на 25% больше, чем на карьере СКМ (48 м/ч).

Кроме того, при бурении взрывных скважин на карьере СКМ наблюдается повышенный расход буровых коронок. Например, в июне 2021 г. средняя стойкость коронки на Главном карьере оказалась на 60% больше, чем на карьере СКМ.

Сравнение строения массива, минералогического состава и механических свойств горных пород

Собственно-Качканарское месторождение титаномагнетитовых руд представлено преимущественно оруденелыми диаллаговыми пироксенитами, местами оливинсодержащими пироксенитами, залегающими среди габбро.

К основополагающему фактору, влияющему на различия в процессе бурения горных пород Собственно-Качканарского и Гусевогорского месторождений,

можно отнести степень однородности массивов [12]. Так, например, более 95% массива Собственно-Качканарского месторождения сложены диаллаговыми пироксенитами.

Гусевгорское месторождение имеет более разнообразное строение. Несмотря на то, что, как и для СКМ, диаллаговые пироксениты являются преобладающими, в строении массива Гусевгорского месторождения принимают значительное участие амфиболовые и оливино-вые пироксениты. Наряду с этим широко развит жильный комплекс, представленный плагиоклазитами. В отличие от Гусевгорского, Собственно-Качканарский массив крайне беден жильными породами и продуктами изменения пироксенитов.

Несмотря на то, что массивы Собственно-Качканарского и Гусевгорского месторождений в основном сложены одними породами, их физико-механические свойства различаются. Породы СКМ являются более прочными, чем породы Гусевгорского месторождения.

Существенным фактором, влияющим на процесс бурения, является трещиноватость массива, которая вместе с другими тектоническими нарушениями характеризует пространственную неоднородность и анизотропность свойств слагающих его пород.

Залегание мелкоблочных массивов на Гусевгорском месторождении приурочено к тектоническим зонам, которые вытянуты в субмеридиональном и субширотном направлениях.

Основной причиной образования мелкоблочных массивов на базе крупного эффузивного геологического тела стало тектоническое расслоение пород, интенсивность которого была дифференцированной по глубине и латерали. Отдельные участки массива оказались расслоенными очень интенсивно, на других участках расслоенность пород оказалась в

эмбриональной стадии. Участки грубого расслоения представляют собой крупноблочный массив. Основная часть месторождения сложена среднеблочными породами.

Разрывная тектоника на Собственно-Качканарском месторождении проявлена очень слабо. Месторождение на 2/3 массива сложено слаботрещиноватыми породами. Зоны интенсивно трещиноватых пород, составляющих около 14% от всех пород массива, имеют мощность от 10 до 40 м и отмечаются в основном в верхней части разреза. Около 20% массива составляют трещиноватые породы.

Также одним из факторов, определяющим меньшую скорость бурения горных пород на карьере СКМ, является зернистость горных пород, слагающих массивы месторождений. Так, породы, имеющие одинаковое минеральное содержание, но отличающиеся зернистостью, бурятся по-разному. Порода с крупной зернистостью бурится легче и вызывает меньший износ буровой коронки, чем мелкозернистая порода.

Для сравнения условий бурения на участках проведения хронометража были приняты во внимание описание и результаты опробования керна скважин эксплуатационной разведки, которые расположены в непосредственной близости от технологических скважин, в процессе бурения которых проведен хронометраж.

Несмотря на то, что оба взрывных блока (на карьере СКМ и на Главном карьере) в основной своей массе сложены диаллаговыми пироксенитами, массивы имеют значительные отличия в своем строении, оказывающие большое влияние на процесс бурения.

Основное отличие заключается в том, что массив взрывного блока на карьере СКМ имеет более однородное строение, по сравнению с блоком на Главном карьере, в массиве которого помимо диалла-

говых пироксенитов, в том числе оливинсодержащих, встречается плагиоклазит, представленный прожилками и жилами мощностью до 0,5 м.

По степени зернистости блоки также имеют значительные различия. Блок на карьере СКМ в основном имеет мелкозернистую структуру, встречаются небольшие участки крупнозернистой структуры.

Массив блока на Главном карьере более неоднороден по структуре — от мелко- до гигантозернистой, участки с разной зернистостью чередуются и занимают значительную долю по длине керна.

Массив взрывного блока на карьере СКМ состоит из пород со слабой трещиноватостью, равномерно развитой по всему блоку.

Массив взрывного Главного карьера характеризуется развитой трещиноватостью, изменчивостью состава и структуры горных пород и наличием плагиоклазитовых жил.

Из анализа степени различия данных опробования керна скважин эксплуатационной разведки на участках проведения хронометража следует, что содержание Fe, V_2O_5 и TiO_2 на карьере СКМ больше соответственно на 12, 11 и 13%, чем на Главном карьере. Эти показатели могут влиять на скорость бурения.

Отличие в структурном строении массивов взрывных блоков характеризуется выходом керна, который составляет на Главном карьере 76% и на карьере СКМ 98,5%. Этот показатель на карьере СКМ на 30% больше, чем на Главном карьере.

Представляется целесообразной оценка влияния на скорость бурения и износ (стойкость) буровых коронок таких механических характеристик пород, как абразивность и истираемость. Однако испытания пород и руд по этим показателям на АО «ЕВРАЗ КГОК» не проводились.

В результатах опробования керна эксплуатационных скважин приведен коэффициент измельчаемости ($K_{изм}$), изменение которого на различных участках массива может охарактеризовать процесс механического разрушения пород и обосновать изменение скорости бурения. Исследования измельчаемости руд на АО «ЕВРАЗ КГОК» проводятся в течение ряда лет по методике [13] на основании анализа данных величины подрешетного продукта при обработке керновых проб на автоматическом приборазделочном модуле ESSA.

По результатам определения измельчаемости руд службой главного геолога построены планы карьеров с распределением коэффициента измельчаемости руд. Более высокое значение коэффициента измельчаемости соответствует увеличению сопротивляемости руды измельчению.

Общий фон величины коэффициента измельчаемости руд на участке № 1 (участок хронометража) карьера СКМ выше, чем на Главном карьере.

По результатам определения измельчаемости руд из 60-метровых скважин эксплуатационной разведки, пробуренных на участках проведения хронометража на участке № 1 карьера СКМ, $K_{изм} = 4,45$, что на 22% выше, чем на Главном карьере ($K_{изм} = 3,64$). Этот показатель однозначно влияет на уменьшение скорости бурения и повышенный износ буровых коронок на карьере СКМ.

Заключение

На основании изучения особенностей геологического строения и сравнения строения массива, минералогического состава и механических свойств горных пород Собственно-Качканарского и Гусевогорского месторождений на участках проведения хронометражных работ установлены основные факторы, влияющие на уменьшение скорости бу-

рения технологических скважин станками пневмоударного бурения и снижение износостойкости буровых коронок на карьере СКМ.

Главным фактором, вызывающим уменьшение скорости бурения на карьере СКМ по сравнению со скоростью бурения на Главном карьере, является меньшая степень трещиноватости массива, далее по степени значимости следуют такие факторы, как неоднородность (разнообразие) минералогического состава на Главном карьере и преобладание мелкозернистых пироксенитов на карьере СКМ с более высоким коэффициентом истираемости и повышенным содержанием Fe, V_2O_5 и TiO_2 по сравнению с Главным карьером. Результаты проведенных исследований позволяют

обосновать производительность станков пневмоударного бурения и нормировать потребность в буровых коронках.

Вклад авторов

Яковлев А.В. — постановка задачи исследования, проведение экспериментальных работ, анализ результатов исследования, написание статьи.

Шимкив Е.С. — проведение экспериментальных работ, анализ строения массива, минералогического состава и механических свойств горных пород, написание статьи.

Переход Т.М. — выполнение работы по систематизации материала, анализ результатов исследования, написание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опарин В. Н., Тимонин В. В., Карпов В. Н. Количественная оценка эффективности процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2016. — № 6. — С. 60–74.
2. Денисова Е. В., Конуринов А. И. Геомеханическая модель взаимодействия рабочего органа пневмоударной машины с грунтовым массивом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2013. — № 5. — С. 61–70.
3. Yang M., Meng Y., Li G., Han L., Li Y. Effect of grain size and grain content on the hardness and drillability of rocks // Sains Malaysiana. 2014, vol. 43, no. 1, pp. 81–87.
4. Yu B., Zhang K., Niu G. Rock strength determination based on rock drillability index and drilling specific energy: numerical simulation using discrete element method // IEEE Access. 2021, vol. 9, pp. 43923–43937.
5. Moayedini H., Moatamediyan A., Nguyen H., Bui X.-N., Bui D. T., Rashid A. S. A. Prediction of ultimate bearing capacity through various novel evolutionary and neural network models // Engineering with Computers. 2020, vol. 36, no. 2, pp. 671–687.
6. Тимонин В. В., Карпов В. Н. Оценка процесса разрушения горных пород при ударно-вращательном бурении скважин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016. — Т. 2. — № 3. — С. 172–176.
7. Реготунов А. С., Антонов В. А. Регрессионное моделирование экспериментального разрушения кристаллических горных пород // Проблемы недропользования. — 2015. — № 5. — С. 37–45.
8. Song C., Chung J., Cho J., Nam Y. Optimal design parameters of a percussive drilling system for efficiency improvement // Advances in Materials Science and Engineering. 2018, vol. 2018, pp. 1–13.
9. Kang H., Park J., Cho J., Jang J., Kim K., Lee J. Optimal button arrangement of a percussion drill bit and its operating condition for improving drilling efficiency // Journal of Mechanical Engineering Science. 2018, vol. 232, no. 16, pp. 2887–2898.

10. Zhang X., Zhang S., Luo Y., Wua D. Experimental study and analysis on a fluidic hammer – an innovative rotary-percussion drilling tool // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019, vol. 173, pp. 362 – 370.

11. Карпов В. Н., Тимонин В. В., Конурин А. И., Ткачук А. К. Анализ проблем нормирования буровых работ при пневмоударной проходке взрывных скважин на горных предприятиях России // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. – 2018. – Т. 6. – С. 43–57. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-6-43-57.

12. Селиванов Д. А., Быховский Л. З., Емельянов С. А. Оценка группы сложности геологического строения месторождений Качканарской группы по количественным показателям // *Разведка и охрана недр*. – 2014. – № 1. – С. 59 – 64.

13. Бузмаков В. Н. Определение физико-механических свойств руды при пробоподготовке / *Геомеханика в горном деле: доклады Всероссийской научно-технической конференции с международным участием*. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2014. – С. 424–427. **IVAS**

REFERENCES

1. Oparin V. N., Timonin V. V., Karpov V. N. Quantitative assessment of the efficiency of the process of rock destruction during impact-rotational drilling of wells. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2016, no. 6, pp. 60 – 74. [In Russ].

2. Denisova E. V., Konurin A. I. Geomechanical model of interaction of the working organ of a pneumatic impact machine with a soil mass. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2013, no. 5, pp. 61 – 70. [In Russ].

3. Yang M., Meng Y., Li G., Han L., Li Y. Effect of grain size and grain content on the hardness and drillability of rocks. *Sains Malaysiana*. 2014, vol. 43, no. 1, pp. 81 – 87.

4. Yu B., Zhang K., Niu G. Rock strength determination based on rock drillability index and drilling specific energy: numerical simulation using discrete element method. *IEEE Access*. 2021, vol. 9, pp. 43923 – 43937.

5. Moayedi H., Moatamediyan A., Nguyen H., Bui X.-N., Bui D. T., Rashid A. S. A. Prediction of ultimate bearing capacity through various novel evolutionary and neural network models. *Engineering with Computers*. 2020, vol. 36, no. 2, pp. 671 – 687.

6. Timonin V. V., Karpov V. N. Evaluation of the process of rocks destruction by impact-rotational drilling. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2016. vol. 2, no. 3, pp. 172 – 176. [In Russ].

7. Regotunov A. S., Antonov V. A. Regression modeling of experimental destruction of crystalline rocks. *Problems of Subsoil Use*. 2015, no. 5, pp. 37 – 45. [In Russ].

8. Song C., Chung J., Cho J., Nam Y. Optimal design parameters of a percussive drilling system for efficiency improvement. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 2018, pp. 1 – 13.

9. Kang H., Park J., Cho J., Jang J., Kim K., Lee J. Optimal button arrangement of a percussion drill bit and its operating condition for improving drilling efficiency. *Journal of Mechanical Engineering Science*. 2018, vol. 232, no. 16, pp. 2887 – 2898.

10. Zhang X., Zhang S., Luo Y., Wua D. Experimental study and analysis on a fluidic hammer – an innovative rotary-percussion drilling tool. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019, vol. 173, pp. 362 – 370.

11. Karpov V. N., Timonin V. V., Konurin A. I., Tkachuk A. K. Analysis of the rationing problems of drilling operations during pneumatic impact drilling of blast wells at mining enterprises of Russia. *Interexpo GEO-Siberia*. 2018, vol. 6, pp. 43 – 57. [In Russ]. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-6-43-57.

12. Selivanov, D. A., Bykhovsky L. Z., Emelyanov S. A. Evaluation of the complexity level for the geological structure of the deposits of Kachkanarskaya group on quantitative indicators. *Prospect and protection of mineral resources*. 2014, no. 1, pp. 59 – 64. [In Russ].

13. Buzmakov V. N. Determination of physical and mechanical properties of ore during sample preparation. *Geomekhanika v gornom dele: doklady Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Geomechanics in mining: reports of the All-Russian Scientific and Technical Conference with international participation], Ekaterinburg, IGD UrO RAN, 2014, pp. 424 – 427. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Яковлев Алексей Викторович*¹ – канд. техн. наук,
зав. сектором, e-mail: lubk_igd@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0009-9894,

*Шимкив Екатерина Сергеевна*¹ – научный сотрудник,
e-mail: ekaterina-busargina@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8040-1354,

*Переход Татьяна Максимовна*¹ – ведущий инженер,
e-mail: ztm1953@mail.ru,

¹ Институт горного дела Уральского отделения РАН.

Для контактов: Яковлев А.В., e-mail: lubk_igd@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*A.V. Yakovlev*¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector,
e-mail: lubk_igd@mail.ru,
ORCID ID: 0000-0002-0009-9894,

*E.S. Shimkiv*¹, Researcher,
e-mail: ekaterina-busargina@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8040-1354,

*T.M. Perekhod*¹, Leading Engineer,
e-mail: ztm1953@mail.ru,

¹ Institute of Mining,
Ural Branch of Russian Academy of Sciences,
620075, Ekaterinburg, Russia.

Corresponding author: A.V. Yakovlev, e-mail: lubk_igd@mail.ru.

Получена редакцией 01.11.2021; получена после рецензии 11.03.2022; принята к печати 10.04.2022.

Received by the editors 01.11.2021; received after the review 11.03.2022; accepted for printing 10.04.2022.

