

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЭКСКАВАТОРА WK-35

М.А. Маринин¹, Р.А. Рахманов², И.А. Аленичев³, П.И. Афанасьев¹, В.И. Сушкина¹

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

² Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Москва, Россия

³ ООО «Полюс Проект», Красноярск, Россия

Аннотация: Представлена методика оценки влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на производительность экскаватора WK-35 при погрузке автосамосвала CAT 793D. Методика базируется на данных фотопланиметрического анализа, фотовидеофиксации процесса экскавации и данных системы диспетчеризации карьера, собранных по мере отработки взорванного блока. Сбор данных осуществлялся при работе горной техники на подготовленных взрывным способом к выемке вскрышных уступах золоторудного карьера. По данным фотопланиметрического анализа определены сменная средневзвешенная фракция взорванной горной массы (в пределах 350–550 мм) и значение коэффициента ее однородности (от 1,5 до 2,2). По результатам исследования установлены количественные зависимости влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на производительность экскаватора WK-35 при погрузке автосамосвала CAT 793D. Полученная зависимость фактической минутной производительности WK-35 при погрузке CAT 793D от средневзвешенного куска взорванной горной массы имеет высокую степень взаимосвязи. Полученная зависимость минутной производительности WK-35 при погрузке CAT 793D от процента выхода фракции более 1 м является менее выраженной. Анализ данных производительности экскаватора WK-35 свидетельствует о существенной чувствительности экскаватора WK-35 к качеству подготовленного забоя. Так, расчетная производительность, по данным хронометражу, снижается в 1,5 раза при увеличении средневзвешенного куска с 350 до 550 мм.

Ключевые слова: буровзрывные работы, взорванная горная масса, гранулометрический состав, негабарит, фотопланиметрический анализ, экскавация, производительность, экскаватор WK-35, автосамосвал CAT 793D.

Благодарность: Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2023 г. № FSRRW-2023-0002.

Для цитирования: Маринин М. А., Рахманов Р. А., Аленичев И. А., Афанасьев П. И., Сушкина В. И. Изучение влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на производительность экскаватора WK-35 // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 6. – С. 111–125. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_111.

Effect of grain size distribution of blasted rock on WK-35 shovel performance

M.A. Marinin¹, R.A. Rakhmanov², I.A. Alenichev³, P.I. Afanasyev¹, V.I. Sushkova¹

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

² Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources
of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
³ «Polyus Project» LLC, Krasnoyarsk, Russia

Abstract: The article presents the assessment procedure of the effect exerted by the grain size distribution in blasted rock on the performance of WK-35 shovel in loading CAT 793D dump truck. The procedure includes the digital planimetry, photography and video recording of excavation process, and the dispatching control data accumulated during excavation of a blasted block in an open pit mine. The information was accumulated during operation of mining machines on pre-blasted stripping benches in a gold mine. The planimetric data from photography are used to determine the weighted average fraction in blasted rock per shift (in a range of 350–550 mm) and the uniformity factor of blasted rocks (from 1.5 to 2.2). From the studies, the quantitative relationships are set between the grain size distribution in blasted rocks and the performance of WK-35 shovel in loading CAT 793D dump truck. The relationship between the actual capacity per minute of WK-35 shovel in loading CAT 793D dump truck and the weighted average size of blasted rock demonstrates their high interdependence. The relationship between the yield percent of the size larger than 1 m is less intense. The data analysis of WK-35 shovel performance displays an appreciable sensitivity of WK-35 shovel to the pre-blasted rock quality. For instance, the estimated productivity of the shovel according to timekeeping drops by 1.5 times as the weighted average size of blasted rock increases from 350 to 550 mm.

Key words: drilling and blasting, blasted rock mass, grain size distribution, oversize, planimetric analysis of photographs, excavation, production capacity, WK-35 shovel, dump truck CAT 793D.

Acknowledgements: The study was supported under the state contract in the sphere of scientific research in 2023, Grant No. FSRRW-2023-0002.

For citation: Marinin M. A., Rakhmanov R. A., Alenichev I. A., Afanasyev P. I., Sushkova V. I. Effect of grain size distribution of blasted rock on WK-35 shovel performance. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(6):111-125. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_6_0_111.

Введение

Условия снижения качества и количества полезного компонента в руде, увеличение глубины отработки месторождений, повышение коэффициента вскрыши, с одной стороны [1 – 3], и увеличение интенсивности отработки вследствие высокой производительности горнотранспортного оборудования, с другой стороны [4 – 6], обуславливают необходи-

мость обоснования параметров открытой разработки рудных месторождений для оптимизации производственных затрат всего горного передела.

Буровзрывные работы (БВР), находясь в начале горного передела, определяют последующую эффективность всех технологических процессов. Каждый процесс добычи и переработки в той или иной мере связан с БВР и находится в

прямой или косвенной зависимости от них [7 – 9].

Так, например, на этапе экскавации горных пород качество подготовленного массива отражается на производительности экскаваторно-автомобильного комплекса (ЭАК). При наличии во взорванной горной массе (ВГМ) большого количества негабаритных кусков ухудшаются условия работы экскаваторов и значительно снижается их производительность, увеличиваются простоя транспортных средств под погрузкой и повышается их износ из-за неравномерной загрузки кузова. С уменьшением же величины средневзвешенного размера куска ВГМ растет производительность экскаватора и снижаются удельные затраты на процесс экскавации [10 – 12].

Повышение удельного расхода ВВ, с одной стороны, приводит к выходу меньшей фракции и увеличивает производительность экскаватора, а с другой стороны – может значительно увеличить удельные затраты по процессу БВР. Таким образом, для конкретного горного предприятия необходимый гранулометрический состав ВГМ должен устанавливаться исходя из технико-экономического обоснования.

В работах [13, 14] описаны подходы к оценке производительности экскаваторов типа «прямая лопата» большой мощности. Авторы отмечают, что значительное влияние на производительность экскаватора оказывает величина средневзвешенного размера куска ВГМ.

Например, применительно к карьерным экскаваторам модели ЭКГ-32Р производителем рекомендуются следующие номинальные условия, которые относятся к качеству подготовленного забоя: это средневзвешенный размер куска в поперечнике до 300 мм и негабаритная по ковшу фракция (более 2/3 наименьшего размера зева ковша), не превышающая 2% [15].

Степень дробления горных пород характеризуется гранулометрическим составом, показывающим процентное соотношение кусков различной крупности в развале. Значительный вклад в изучение вопроса характера воздействия продуктов детонации взрывчатых веществ на распределение гранулометрического состава внесли ученые [16 – 18], и по настоящее время тема широко изучается как отечественными исследователями [19 – 21], так и зарубежными [22 – 24].

В мировой практике принято, что критерием качества взрывной подготовки массива горных пород является выход определенного или заданного гранулометрического состава ВГМ, а также выход негабаритной фракции, не превышающий заданный показатель. Регулирование степени выхода гранулометрического состава ВГМ достигается за счет подбора оптимальных параметров БВР [10, 11, 25] с учетом улучшения степени изученности горного массива [26, 27] и его районирования.

Методы

С целью установления количественных зависимостей влияния гранулометрического состава ВГМ на производительность экскаватора WK-35 при погрузке автосамосвала CAT 793D предлагается описанная ниже методика сбора и обработки данных на вскрышных участках золоторудного карьера [28]. Структура методики сбора и обработки данных приведена в табл. 1.

Сбор данных для оценки гранулометрического состава ВГМ по мере отработки блоков проводился непосредственно из кабины машиниста экскаватора WK-35 методом циклической фотофиксации забоя. Работа из кабины экскаватора позволяет получать необходимые данные по мере продвижения забоя. Появляется возможность проведения замеров в течение длительного времени, независимо

Таблица 1

Структура методики сбора и обработки данных
Structure of the data collection and processing methodology

Исследуемый параметр	Гранулометрический состав ВГМ	Производительность ЭАК
Данные	- средневзвешенный кусок ВГМ; - коэффициент однородности ВГМ; - процентный выход фракции более 1 м	- время цикла погрузки автосамосвала; - количество требуемых ковшей до полной загрузки автосамосвала; - масса загруженной ВГМ
Сбор и анализ данных	- фотофиксация забоя по мере его подвигания; - фотопланиметрический анализ изображений; - построение кумулятивной кривой и гистограммы распределения граностава	- фото-видеофиксация забоя по мере его подвигания; - анализ материалов фото-видеофиксации; - анализ данных системы диспетчеризации карьера

от погодных условий, что повышает достоверность оценки результатов взрыва. Другим преимуществом этого способа является сравнительно лучшее соблюдение параллельности плоскостей объектива и снимаемой поверхности забоя, что также снижает до минимума ошибки, связанные с оптическими искажениями.

Для оценки гранулометрического состава ВГМ чаще всего применяется фотопланиметрический способ [29–31]. Из полученного массива данных фотофиксации отбирались качественные изображения забоя с учетом их привязки к хронометражу работы экскаватора, далее проводился фотопланиметрический анализ этих изображений в ПО «Wip Frag». Для обеспечения достоверности результата было принято к анализу не менее двух изображений за 1 ч работы экскаватора.

«WipFrag» использует входные изображения, чтобы очертить фрагменты горных пород в развале с использованием технологии сегментации изображения. Как правило, для улучшения результатов анализа и повышения точности выполняется обширное ручное редактирова-

ние очертаний фрагментов исследуемых горных пород. Результатом процесса обработки является кривая распределения Розина-Раммлера, которая является двухпараметрической величиной и характеризуется с помощью средневзвешенного размера x_c (данный размер можно определить как выход куска в 63,2% на кумулятивной кривой) и n – коэффициента однородности (параметр, описывающий разброс распределения). Уравнение Розина-Раммлера [32]:

$$y = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{x_c} \right)^n \right], \quad (1)$$

где y – совокупный процент прохождения; x – размер частицы; x_c – характерный (средневзвешенный) размер куска взорванной горной массы, который является размером куска при прохождении 63,2% на кумулятивной кривой; n – параметр, описывающий разброс распределения.

Для условий исследования характерно распределение значения показателя n в пределах от 1 до 3 (табл. 2) [33].

Пример сбора данных для оценки гранулометрического состава ВГМ по мере

Таблица 2

Значение параметра n
The value of the parameter n

$n = 1$	$n = 3$
Характеризуется умеренно хорошо дифференцированным гранулометрическим составом, где самые мелкие куски составляют примерно 1/16 размера самого большого куска. Соотношение числа наибольших кусков к числу наименьших составляет примерно 1:2. Области частиц, которые слишком малы для разрешения, покрывают около 30% изображения	Характеризуется очень равномерным распределением кусков по размерам, где самые маленькие из обычных видимых кусков составляют примерно 1/3 размера самого большого куска

отработки забоя и его сегментации приведен на рис. 1. и 2.

В качестве известных линейных параметров, по которым осуществлялась калибровка, приняты габариты ковша экскаватора. Также с целью дополнительной заверки сходимости результатов измерения гранулометрического состава ВГМ выбран дополнительный элемент с известными линейными размерами (длина кузова автосамосвала). На рис. 3 приведена сравнительная оценка по двум линейным параметрам – ширине ковша экскаватора и длине кузова автосамосвала. Расхождение в значениях результатов составило менее 2%.

Анализ показателей работы ЭАК, занятого в процессе выемочно-погрузочных и транспортных работ, проводился на основании данных выгрузки системы диспетчеризации карьера и данных фотовидеофиксации, получаемых в ходе отработки блока [34–36].

В табл. 3 приведены показатели, которые отбирались по данным выгрузки системы диспетчеризации карьера и данным фотовидеофиксации отработки блока.

По данным фотовидеофиксации можно вычислить «чистое» время цикла загрузки автосамосвала и необходимое количество ковшей погрузки. Под «чистым» временем цикла понимается время от открытия первого ковша до открытия последнего ковша в цикле, тем самым

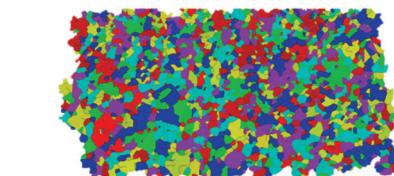


Рис. 1. Сегментация фракции, съемка забоя
Fig. 1. Fraction segmentation, face survey

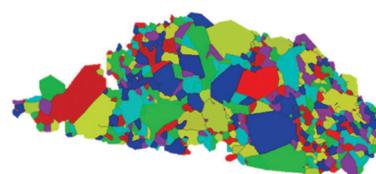


Рис. 2. Сегментация фракции, съемка ВГМ в кузове автосамосвала
Fig. 2. Segmentation of the fraction, shooting of VGM in the back of a dump truck

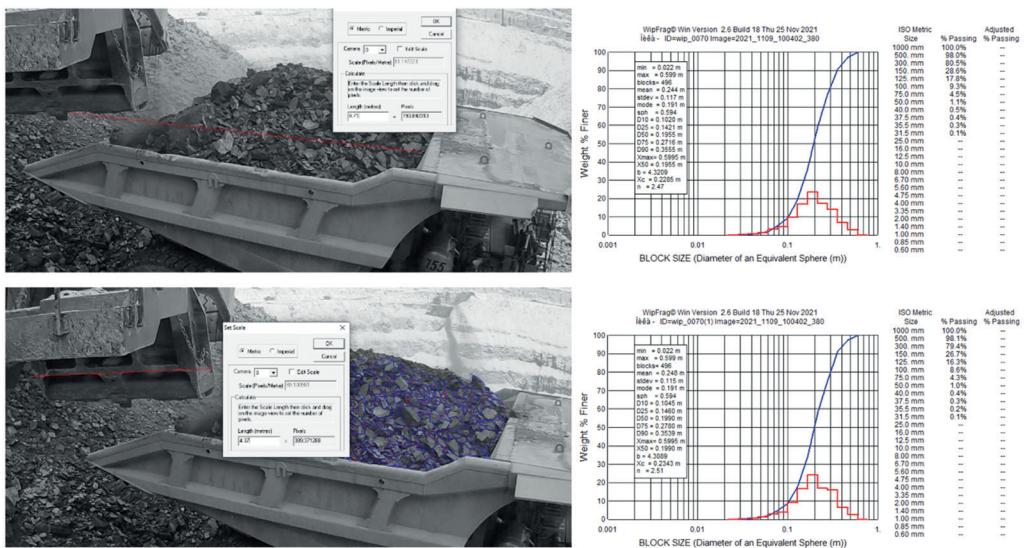


Рис. 3. Заверка сходимости результатов измерения гранулометрического состава ВГМ

Fig. 3. Verification of the convergence of the measurement results of the granulometric composition of VGM

Таблица 3

Отбор данных

Data selection

№ п/п	По данным фотовидеофиксации	По данным системы диспетчеризации
1	№ машины	№ машины
2	время начала погрузки*	время начала погрузки
3	время окончания погрузки**	время окончания погрузки
4	общее время погрузки, с	общее время погрузки, с
5	кол-во ковшей до полной загрузки	масса общая, т

* – время открытия первого ковша экскаватора; ** – время открытия последнего ковша экскаватора

в учет не принимается время, затраченное на подготовительные операции. При этом система диспетчеризации карьера время цикла загрузки автосамосвала считает с момента постановки автосамосвала под погрузку до начала его движения в загруженном состоянии.

Гранулометрический состав ВГМ оказывает влияние на время набора ковша и степень его наполнения, что впоследствии отражается на времени цикла загрузки автосамосвала. Причем степень загруженности автосамосвала непосредственно не зависит от грансостава, что подтверждается данными выгрузки из

системы диспетчеризации карьера. Степень загруженности автосамосвала регулируется оператором экскаватора.

Используя приведенные выше данные, можно установить минутную производительность экскаватора в рамках сменной работы:

$$Q_{\min} = \frac{\sum N_i \cdot M_i}{\sum N_i \cdot T_i}, \text{т/мин}, \quad (2)$$

где N_i – процент загрузки автосамосвала i -м количеством ковшей; M_i – масса ВГМ, загруженной i -м количеством ковшей, т; T_i – время цикла загрузки автосамосвала i -м количеством ковшей, мин.

Таблица 4

Основные горно-геологические характеристики исследуемых блоков
The main mining and geological characteristics of the studied blocks

№ п/п	Наименование горных пород	$K_{\text{креп}}$	$K_{\text{бур}}$	$K_{\text{взрыв}}$
1	Слюдисто-кварц-карбонатные породы	12	12	5
2	Углеродистые карбонат-кварц-слюдистые породы	10	10	5
3	Динамосланцы, кварц-слюдистые углеродистые	11	11	4

Далее, зная минутную производительность экскаватора, можно установить ее зависимость от средневзвешенного куска ВГМ и процента выхода фракции более 1 м.

Исходные данные

Для апробации приведенной выше методики проведена серия замеров на подготовленной взрывом ВГМ на вскрышных участках золоторудного карьера. ВГМ была отработана экскаватором WK-35 (емкость ковша – 35 м³) и автосамосвалами CAT 793D (грузоподъемность – 220 т) [28]. Сбор данных осуществлялся в светлое время суток в течение 20 смен работы экскаватора. За период наблюдения было отработано два блока с общим объемом горной массы порядка 300 тыс. м³ при средней плотности породы 2,8 т/м³. Исследуемые блоки отно-

сятся к единой зоне, принятой на карьере по результатам геомеханического картирования, и схожи по своим горно-геологическим характеристикам, их значения приведены в табл. 4. Для минимизации влияния человеческого фактора сбор данных осуществлялся в рамках работы одной смены операторов WK-35.

Принятые параметры БВР для исследуемых блоков приведены в табл. 5.

В качестве примера в табл. 6 приведена выборка данных по 6 сменам работы.

Результаты и обсуждение

Объем полученных данных хронометражных наблюдений при работе ЭАК (WK-35 + CAT 793D) позволил построить зависимости минутной производительности WK-35 при погрузке CAT 793D от средневзвешенного куска ВГМ (рис. 4) и

Таблица 5

Параметры БВР
BVR Parameters

№	Наименование показателя	Ед. изм.	Проектные данные
1	Глубина скважин	м	17,5
2	Величина перебора скважин	м	2,5
3	Сетка расположения скважин (шахматная)	м×м	9×7,8
4	Направление основных скважин	град.	90
5	Диаметр основных скважин	мм	311,1
6	Выход горной массы с 1 пог. м. скважины	м ³	55
7	Удельный расход ВВ на 1м ³	кг/м ³	1,1
8	Тип ВВ	кг	ВЭТ-700 / ПТ-П 750
9	Схема инициирования		диагональная
10	Интервалы замедлений: эшелон / контрольный ряд	мс	42 / 109

Таблица 6

Выборка данных
Data sampling

Выборка данных, №	Средне- взвешен. кусок ВГМ	Процент загрузки i -м количеством ковшей, % / средняя масса загрузки, т / / среднее время загрузки, мин				Среднее «чистое» время за- грузки, мин	Среднее время загрузки по диспет- чер., мин	Процент выхода фракции более 1 м, %
		3 ковша	4 ковша	5 ковшей	6 ковшей			
1	400	—	77/ 229/ 2:12	23/ 233/ 3:11	—	2:26	3:08	2
2	450	1/ 237/ 2:04	73/ 223/ 2:15	26/ 227/ 2:57	—	2:26	2:52	2,5
3	350	—	95/ 227/ 1:42	5/ 233/ 3:12	—	1:47	2:36	2
4	500	—	41/ 221/ 2:18	56/ 230/ 3:37	3/ 244/ 4:40	3:06	3:44	11,5
5	550	—	40/ 221/ 2:32	60/ 229/ 3:35	—	3:10	3:49	8,5
6	300	6/ 228/ 1:27	78/ 230/ 2:04	15/ 233/ 2:58	1/ 246/ 3:50	2:11	3:11	1,5

минутной производительности WK-35 при погрузке CAT 793D от процента выхода фракции более 1 м (рис. 5). Получ-

ченная зависимость минутной производительности WK-35 при погрузке CAT 793D от средневзвешенного куска ВГМ

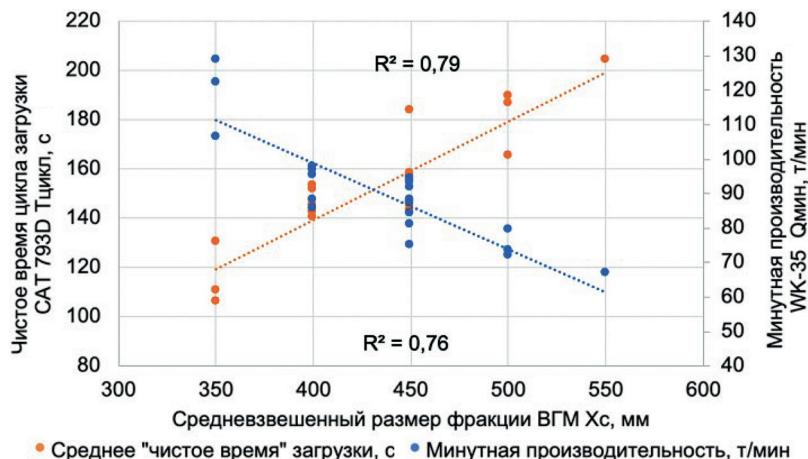


Рис. 4. Зависимость минутной производительности WK-35 при погрузке CAT 793D от средневзвешенного куска ВГМ

Fig. 4. Dependence of minute performance of WK-35 when loading CAT 793D on weighted average piece of VGM

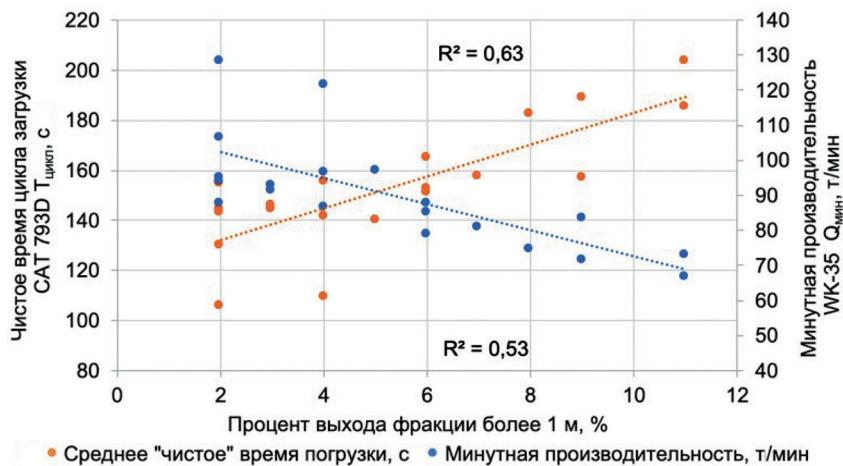


Рис. 5. Зависимость минутной производительности WK-35 при погрузке CAT 793D от процента выхода фракции более 1 м

Fig. 5. Dependence of the minute performance of WK-35 when loading CAT 793D on the percentage of fraction yield of more than 1 meter

(см. рис. 4) в пределах от 350 до 550 мм имеет высокую степень взаимосвязи. Зависимость же минутной производительности WK-35 при погрузке CAT 793D от процента выхода фракции более 1 м является менее выраженной. При этом можно констатировать, что средневзвешенный размер куска ВГМ и процент

выхода фракции более 1 м существенно влияет на производительность экскаватора WK-35.

Анализ чувствительности производительности экскаватора WK-35 к средневзвешенному куску ВГМ в забое отражен в табл. 7, и на основе данных полученных зависимостей спрогнозированы

Таблица 7

Анализ чувствительности производительности экскаватора WK-35 к средневзвешенному куску ВГМ в забое
Analysis of the sensitivity of the performance of the excavator WK-35 to the weighted average piece of HGM in the bottom

Средневзвешенный кусок ВГМ	350–400	400–500	500–550
Процент выхода фракции более 1 м, %	3,5	4,5	8
Коэффициент однородности ВГМ, п	1,75 – 1,92	1,63 – 2,18	1,55 – 1,97
Ср. процент загрузки CAT 220 4 ковшами, %	90	78	42
Ср. процент загрузки CAT 220 3 ковшами, %	6	1	–
Средняя масса загрузки, т	227	222	226
Среднее «чистое» время загрузки, мин	2:06	2:32	3:11
Среднее время загрузки по данным системы диспетчеризации карьера, мин	2:55	3:08	3:50
Средняя минутная производительность, т/мин	108	86	63
Расчетная средняя сменная производительность, м ³ (при КИО = 0,77; КТГ = 0,87; КИРВ = 0,8)	15 000	12 000	8500

среднесменные производительности экскаватора при изменении средневзвешенной фракции ВГМ. Расчет показывает, что при правильном подборе параметров БВР и организации выемочно-погрузочных работ производительность ЭАК за смену может быть существенно наращена.

По данным табл. 6, разброс необходимого количества ковшей до полной загрузки может быть от 3 до 6 и преимущественно составляет 4 ковша, этот показатель также зависит от выхода средневзвешенного куска. Согласно табл. 7, расчетная производительность по данным хронометража снижается более чем в 1,5 раза при увеличении выхода средневзвешенного куска с 350 до 550 мм. Таким образом, наблюдается значительная чувствительность экскаватора WK-35 к качеству подготовленного забоя.

Заключение

1. В работе предложена методика оценки влияния гранулометрического состава ВГМ на производительность экскаватора WK-35 при погрузке автосамосвала CAT 793D. Методика базируется на данных фотопланиметрического анализа, фотовидеофиксации процесса экскавации и данных системы диспетчеризации карьера, собранных по мере отработки блока.

2. Для условий исследуемого блока по данным фотопланиметрического анализа установлено, что по мере его отработки сменная средневзвешенная фракция ВГМ изменяется в пределах 350 – 550 мм, а значение коэффициента однородности ВГМ может быть от 1,5 до 2,2.

3. Зависимость минутной производительности WK-35 при погрузке CAT 793D от средневзвешенного куска ВГМ в пределах от 350 до 550 мм имеет высокую степень взаимосвязи. Зависимость же минутной производительности WK-35 при погрузке CAT 793D от процента выхода фракции более 1 м является менее выраженной.

4. Анализ данных производительности экскаватора WK-35 свидетельствует о существенной чувствительности экскаватора WK-35 к качеству подготовленного забоя. Так, расчетная производительность по данным хронометража снижается в 1,5 раза при увеличении средневзвешенного куска с 350 до 550 мм.

5. Выход средневзвешенного куска ВГМ 300 – 400 мм позволяет обеспечить погрузку CAT 793D экскаватором WK-35 более чем в 90% случаев четырьмя ковшами в «чистом» цикле загрузки кузова (без подготовительных операций) до 2 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fomin S. I., Ivanov V. V., Semenov A. S., Ovsyannikov M. P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol. 15, no. 11, pp. 1306 – 1311.
2. Брагин В. И., Харитонова М. Ю., Мацко Н. А. Вероятностный подход к оценке динамического бортового содержания // Записки Горного института. – Т. 251. – С. 617 – 625. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.1.
3. Yakovlev V. L., Glebov A. V., Bersenyov V. A., Kulniyaz S. S., Ligotskiy D. N. Influence of an installation angle of the conveyor lift on the volumes of mining and preparing work at quarries at the cyclic-flow technology of ore mining // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. 2020, vol. 4, no. 442, pp. 127 – 137. DOI: 10.32014/2020.2518-170X.93.
4. Fomin S. I., Rodionovkhov S. K., Rodionov A. O. Determining height of benches in open mining of steeply-dipping deposits with consideration of ore losses and dilution // Interna-

tional Journal of Civil Engineering and Technology. 2019, vol. 10, no. 3, pp. 225 – 233. DOI: 10.34218/IJARET.10.3.2019.023.

5. Зырянов И. В., Лель Ю. И., Ильбульдин Д. Х., Мартынов Н. В., Ганиев Р. С. Производительность выемочно-погрузочного оборудования // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2016. – № 8. – С. 11 – 20.

6. Махараткин П. Н., Абдулаев Э. К., Вишняков Г. Ю., Ботян Е. Ю., Пушкирев А. Е. Повышение эффективности функционирования карьерных автосамосвалов на основе обоснования их рациональной скорости с помощью имитационного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 237 – 250. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.

7. Marinina O. A., Kirsanova N. Y., Nevskaya M. A. Curcular economy models in industry: developing a conceptual framework Energies // Energies. 2022, vol. 15, pp. 9376 – 9386. DOI: 10.3390/en15249376.

8. Cameron P., Drinkwater D., Pease J. The ABC of Mine to Mill and metal price cycles / Proceedings 13th AusIMM Mill Operators' Conference. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 2016, pp. 349 – 358.

9. McKee D. Understanding mine to mill. Brisbane Australia: Cooperative research centre for optimising resource extraction, 2013, 96 p.

10. Егоров В. В., Волокитин А. Н., Угольников Н. В., Соколовский А. В. Обоснование параметров и технологии производства буровзрывных работ, обеспечивающих требуемую кусковатость // Горная промышленность. – 2021. – № 3. – С. 110 – 115. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-110-115.

11. Опанасенко П. И., Исайченков А. Б. Оптимизация кусковатости взорванных полускальных вскрышных пород на разрезе «Тугнуйский» // Горный журнал. – 2015. – № 9. – С. 25 – 35. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.12.

12. Репин Н. Я. Временная методика расчета параметров взрывной отбойки пород на угольных разрезах. – М.: ИГД им. А. А. Скочинского, 1976. – 48 с.

13. Артемьев В. Б., Кулецкий В. Н., Исайченков А. Б. Исследование факторов влияющих на производительность экскаватора Bucyrus 495HD в условиях разреза «Тугнуйский» // Уголь. – 2014. – № 4. – С. 69 – 71.

14. Анистратов К. Ю. Технико-экономическое обоснование эффективности применения карьерных экскаваторов ЭКГ-18 с реечным напором ПАО «Уралмашзавод» на угольных разрезах // Горное дело. – 2016. – № 3(9). – С. 6 – 11.

15. Иванов С. Л., Иванова П. В., Кувшинкин С. Ю. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации // Записки Горного института. – 2020. – Т. 242. – С. 228 – 233. DOI: 10.31897/rmi.2020.2.228.

16. Кузнецов В. А., Ситник В. А. Регулирование степени дробления долеритов при взрывной отбойке // Энергетическое строительство. – 1969. – № 6. – С. 50 – 53.

17. Кутузов Б. Н., Рубцов В. К. Физика взрывного разрушения горных пород. – М.: МГИ, 1970. – 178 с.

18. Репин Н. Я. Подготовка и экскавация вскрышных пород угольных разрезов. – М.: Недра, 1978. – 256 с.

19. Moldovan D. V., Chernobai V. I., Kovalevskyi V. N. Solving the issue of regulating the granulometric composition of shattered rock mass depending on the quality of locking explosion products in the explosion cavity // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2017, vol. 8, no. 11. pp. 1133 – 1142.

20. Виноградов Ю. И., Хохлов С. В., Зигангиев Р. Р., Рахманов Р. А. К вопросу проектирования буровзрывных работ на месторождениях со сложным геологическим строением на примере Куранахского рудного поля // Взрывное дело. – 2022. – № 137-94. – С. 45 – 65.

21. Ракишев Б. Р., Орынбай А. А., Ауэзова А. М., Куттыбаев А. Е. Гранулометрический состав взорванных пород при различных условиях взрывания // Горный информационно-

аналитический бюллетень. – 2019. – № 8. – С. 83 – 94. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94.

22. Ouchterlony F., Sanchidrián J. A., Moser P. Percentile fragment size predictions for blast-ed rock and the fragmentation – energy fan // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2017, vol. 50, no. 4, pp. 751 – 779. DOI 10.1007/s00603-016-1094-x.

23. Zhang Z. X., Sanchidrián A. J., Ouchterlony F., Luukkanen S. Reduction of fragment size from mining to mineral processing: A review // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2023, vol. 56, pp. 747 – 778. DOI: 10.1007/s00603-022-03068-3.

24. Rajak M. K., Pradhan G. K., Prince M. J. A. Assessment of blasting quality of an open-cast mine // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. 2019, vol. 8, no. 12, pp. 4396 – 4397. DOI: 10.35940/ijitee.L3912.1081219.

25. Должиков В. В., Рядинский Д. Э., Яковлев А. А. Влияние интервалов замедления на амплитуды волн напряжений при изучении модели взрыва системы скважинных зарядов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 18 – 32. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_18.

26. Ишайский В. А., Мартынушкин Е. А., Васильев А. С., Смирнов С. А. Отбор данных по процессу бурения взрывных скважин при формировании баз алгоритмов машинного обучения // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 4. – С. 116 – 133. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_116.

27. Ишайский В. А., Васильев А. С. Ключевые особенности и проблемы при обработке, анализе и интерпретации данных по процессу бурения взрывных скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 3. – С. 16 – 33. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_16.

28. Аленичев И. А., Рахманов Р. А. Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера // Записки Горного института. – 2021. – Т. 249. – С. 334 – 341. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.2.

29. Koteleva N. I., Khokhlov S. V., Frenkel I. A. Digitalization in open-pit mining. A new approach in monitoring and control of rock fragmentation // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 22, article 10848, pp. 1 – 16. DOI: 10.3390/app112210848.

30. Mohamed F., Riadh B., Abderazzak S., Radouane N., Mohamed S., Ibsa T. Distribution analysis of rock fragments size based on the digital image processing and the Kuz-Ram model cas of Jebel Medjounes quarry // Aspects in Mining and Mineral Science. 2019, vol. 2, no. 4, pp. 325 – 329. DOI: 10.31031/AMMS.2019.02.000545.

31. Bamford T., Esmaeili K., Schoellig A. P. Continuous monitoring and improvement of the blasting process in open pit mines using unmanned aerial vehicle techniques // Remote Sensing. 2020, vol. 12, article 34. DOI: 10.3390/rs12172801.

32. Rosin P., Rammler E. The laws governing the fineness of powdered coal // Journal of the Institute of Fuel. 1933, vol. 7, no. 6, pp. 29 – 36.

33. Maerz N. H., Palangio T. C., Franklin J. A. WipFrag image based granulometry system / Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation. Montreal, Quebec, Canada, 1996, pp. 91 – 99.

34. Курганов В. М., Грязнов М. В., Колобанов С. В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 10 – 21. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10.

35. Великанов В. С. Прогнозирование нагруженности рабочего оборудования карьерного экскаватора по нечетко-логистической модели // Записки Горного института. – 2020. – Т. 241. – С. 29 – 36. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.29.

36. Жариков С. Н. Совершенствование расчета производительности карьерного экскаватора // Записки Горного института. – 2018. – Т. 229. – С. 56 – 61. DOI: 10.25515/ pmi.2018.1.56. ГИАБ

REFERENCES

1. Fomin S. I., Ivanov V. V., Semenov A. S., Ovsyannikov M. P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020, vol. 15, no. 11, pp. 1306 – 1311.
2. Bragin V. I., Kharitonova M. Y., Matsko N. A. A probabilistic approach to the dynamic cut-off grade assessment. *Journal of Mining Institute*, vol. 251, pp. 617 – 625. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.1.
3. Yakovlev V. L., Glebov A. V., Bersenyov V. A., Kulniyaz S. S., Ligotskiy D. N. Influence of an installation angle of the conveyor lift on the volumes of mining and preparing work at quarries at the cyclic-flow technology of ore mining. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences*. 2020, vol. 4, no. 442, pp. 127 – 137. DOI: 10.32014/2020.2518-170X.93.
4. Fomin S. I., Rodionovhkov S. K., Rodionov A. O. Determining height of benches in open mining of steeply-dipping deposits with consideration of ore losses and dilution. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019, vol. 10, no. 3, pp. 225 – 233. DOI: 10.34218/IJARET.10.3.2019.023.
5. Zyryanov I. V., Lel Yu. I., Ilbardin D. H., Martynov N. V., Ganiev R. S. Capacity of winnning-loading equipment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2016, no. 8, pp. 11 – 20. [In Russ].
6. Makharatkin P. N., Abdulaev E. K., Vishnyakov G. Y., Botyan E. Y., Pushkarev A. E. Increase of efficiency of dump trucks functioning on the basis of justification of their rational speed by means of simulation modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 237 – 250. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_237.
7. Marinina O. A., Kirsanova N. Y., Nevskaia M. A. Curcular economy models in industry: developing a conceptual framework Energies. *Energies*. 2022, vol. 15, pp. 9376 – 9386. DOI: 10.3390/en15249376.
8. Cameron P., Drinkwater D., Pease J. The ABC of Mine to Mill and metal price cycles. *Proceedings 13th AusIMM Mill Operators' Conference*. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 2016, pp. 349 – 358.
9. McKee D. *Understanding mine to mill*. Brisbane Australia: Cooperative research centre for optimising resource extraction, 2013, 96 p.
10. Egorov V. V., Volokitin A. N., Ugolnikov N. V., Sokolovskiy A. V. Justification of parameters and technology of drilling and blasting operations to ensure the required lumpiness. *Russian Mining Industry*. 2021, no. 3, pp. 110 – 115. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-3-110-115.
11. Opanasenko P. I., Isaychenkov A. B. Optimization of the lumpiness of blasted semi-rock overburden at the Tugnuisky open pit. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 9, pp. 25 – 35. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.12.
12. Repin N. Ya. *Vremennaya metodika rascheta parametrov vzryvnoy otboyki porod na ugod'nykh razrezakh* [A temporary method for calculating the parameters of explosive rock breaking at coal mines], Moscow, IGD im. A. A. Skochinskogo, 1976, 48 p.
13. Artemyev V. B., Kuletsky V. N., Isaychenkov A. B. Study of factors affecting the performance of the Bucyrus 495HD excavator in the conditions of the Tugnuisky mine. *Ugol'*. 2014, no. 4, pp. 69 – 71. [In Russ].
14. Anistratov K. Y. Feasibility study of the effectiveness of the use of EKG-18 rack-and-pinion excavators of PJSC Uralmashzavod at coal mines. *Gornoje delo*. 2016, no. 3(9), pp. 6 – 11. [In Russ].
15. Ivanov S. L., Ivanova P. V., Kuvshinkin S. Y. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 242, pp. 228 – 233. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.2.228.
16. Kuznetsov V. A., Sitnik V. A. Regulation of the degree of crushing of dolerites during blasting. *Energeticheskoe stroitel'stvo*. 1969, no. 6, pp. 50 – 53.

17. Kutuzov B. N., Rubtsov V. K. *Fizika vzryvnogo razrusheniya gornykh porod* [Physics of explosive destruction of rocks], Moscow, MGI, 1970, 178 p.
18. Repin N. Ya. *Podgotovka i ekskavatsiya vskryshnykh porod ugol'nykh razrezov* [Preparation and excavation of overburden rocks of coal mines], Moscow, Nedra, 1978, 256 p.
19. Moldovan D. V., Chernobai V. I., Kovalevskyi V. N. Solving the issue of regulating the granulometric composition of shattered rock mass depending on the quality of locking explosion products in the explosion cavity. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2017, vol. 8, no. 11. pp. 1133 – 1142.
20. Vinogradov Yu. I., Khokhlov S. V., Zigangirov R. R., Rakhmanov R. A. To the question of design of drilling and blasting works at deposits with a complex geological structure on the example of the Kuranakh ore field. *Explosion technology*. 2022, no. 137-94, pp. 45 – 65. [In Russ].
21. Rakishev B. R., Orynbay A. A., Auezova A. M., Kuttybaev A. E. Grain size composition of broken rocks under different conditions of blasting. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019, no. 8, pp. 83 – 94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-08-0-83-94.
22. Ouchterlony F., Sanchidrián J. A., Moser P. Percentile fragment size predictions for blasted rock and the fragmentation – energy fan. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017, vol. 50, no. 4, pp. 751 – 779. DOI 10.1007/s00603-016-1094-x.
23. Zhang Z. X., Sanchidrián A. J., Ouchterlony F., Luukkanen S. Reduction of fragment size from mining to mineral processing: A review. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2023, vol. 56, pp. 747 – 778. DOI: 10.1007/s00603-022-03068-3.
24. Rajak M. K., Pradhan G. K., Prince M. J. A. Assessment of blasting quality of an open-cast mine. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019, vol. 8, no. 12, pp. 4396 – 4397. DOI: 10.35940/ijitee.L3912.1081219.
25. Dolzhikov V. V., Ryadinsky D. E., Yakovlev A. A. Influence of deceleration intervals on the amplitudes of stress waves during the explosion of a system of borehole charges. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 18 – 32. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_18.
26. Isheyskiy V. A., Martinyskin E. A., Vasilyev A. S., Smirnov S. A. Selection of data on drilling-and-blasting in creation of databases of machine learning algorithms. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 4, pp. 116 – 133. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_4_0_116.
27. Isheyskiy V. A., Vasilyev A. S. Processing, analysis and interpretation of blasthole drilling data – Peculiarities and problems. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 3, pp. 16 – 33. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_16.
28. Alenichev I. A., Rakhmanov R. A. Empirical regularities investigation of rock mass discharge by explosion on the free surface of a pit bench. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 249, pp. 334 – 341. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.2.
29. Koteleva N. I., Khokhlov S. V., Frenkel I. A. Digitalization in open-pit mining. A new approach in monitoring and control of rock fragmentation. *Applied Sciences*. 2021, vol. 11, no. 22, article 10848, pp. 1 – 16. DOI: 10.3390/app112210848.
30. Mohamed F., Riadh B., Abderazzak S., Radouane N., Mohamed S., Ibsa T. Distribution analysis of rock fragments size based on the digital image processing and the Kuz-Ram model cas of Jebel Medjounes quarry. *Aspects in Mining and Mineral Science*. 2019, vol. 2, no. 4, pp. 325 – 329. DOI: 10.31031/AMMS.2019.02.000545.
31. Bamford T., Esmaeili K., Schoellig A. P. Continuous monitoring and improvement of the blasting process in open pit mines using unmanned aerial vehicle techniques. *Remote Sensing*. 2020, vol. 12, article 34. DOI:10.3390/rs12172801.
32. Rosin P., Rammler E. The laws governing the fineness of powdered coal. *Journal of the Institute of Fuel*. 1933, vol. 7, no. 6, pp. 29 – 36.
33. Maerz N. H., Palangio T. C., Franklin J. A. WipFrag image based granulometry system. *Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation*. Montreal, Quebec, Canada, 1996, pp. 91 – 99.

34. Kurganov V. M., Gryaznov M. V., Kolobanov S. V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 10–21. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.10.

35. Velikanov V. S. Mining excavator working equipment load forecasting according to a fuzzy-logistic model. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 241, pp. 29–36. [In Russ]. DOI: 10.31897/pmi.2020.1.29.

36. Zharikov S. N. Improved estimation of open pit excavator capacity. *Journal of Mining Institute*. 2018, vol. 229, pp. 56–61. [In Russ]. DOI: 10.25515/pmi.2018.1.56.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маринин Михаил Анатольевич¹ – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5575-9343,

Рахманов Руслан Азаматович – канд. техн. наук,
научный сотрудник, Институт проблем комплексного
освоения недр РАН, e-mail: ruslan1250@mail.ru,
ORCID ID: 000-0002-5341-2274,

Аленичев Игорь Алексеевич – канд. техн. наук,
руководитель группы разрушения
горных пород взрывом, ООО «Полюс Проект»,
e-mail: AlenichevIA@polyusgold.com,
ORCID ID: 0000-0003-3359-4450,

Афанасьев Павел Игоревич – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: Afanasev_PI@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5271-6121,

Сушкова Вероника Ивановна¹ – лаборант-исследователь,
e-mail: s171560@stud.spmi.ru,

¹ Санкт-Петербургский горный университет.

Для контактов: Маринин М.А., e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.A. Marinin¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5575-9343,

R.A. Rakhmanov, Cand. Sci. (Eng.), Researcher,
Institute of Problems of Comprehensive Exploitation
of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences,
111020, Moscow, Russia, e-mail: ruslan1250@mail.ru,
ORCID ID: 000-0002-5341-2274,

I.A. Alenichev, Cand. Sci. (Eng.), Drill and Blast Group Head,
«Polyus Project» LLC, 660075, Krasnoyarsk, Russia,
e-mail: AlenichevIA@polyusgold.com,
ORCID ID: 0000-0003-3359-4450,

P.I. Afanasyev¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: Afanasev_PI@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-5271-6121,

V.I. Sushkova¹, Research Assistant, e-mail: s171560@stud.spmi.ru,

¹ Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: M.A. Marinin, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 23.11.2022; получена после рецензии 01.03.2023; принята к печати 10.05.2023.

Received by the editors 23.11.2022; received after the review 01.03.2023; accepted for printing 10.05.2023.