

УДК 622.271.3 © С.О. Марков<sup>1</sup>, Д.М. Дубинкин<sup>1</sup>, Е.В. Мурко<sup>2</sup>, 2024UDC 622.271.3 © S.O. Markov<sup>1</sup>, D.M. Dubinkin<sup>1</sup>, E.V. Murko<sup>2</sup>, 2024<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» (КузГТУ), 650000, г. Кемерово, Россия<sup>1</sup> T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation<sup>2</sup> АНО ВО «Университет мировых цивилизаций имени В.В. Жириновского», 119049, г. Москва, Россия,<sup>2</sup> V.V. Zhirinovskiy University of World Civilizations, Moscow, 119049, Russian Federation

✉ e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

✉ e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

# Исследование параметров забойных блоков при выемке наклонных угольных пластов обратными гидролопатами верхним черпанием\*

## Research of face block parameters during inclined coal seams excavation by backhoes using upper digging mode

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-11S-134-139>**МАРКОВ С.О.**

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры открытых горных работ ФГБОУ ВО «КузГТУ», 650000, г. Кемерово, Россия  
e-mail: markovso@kuzstu.ru

**ДУБИНКИН Д.М.**

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры горных машин и комплексов ФГБОУ ВО «КузГТУ», 650000, г. Кемерово, Россия,  
e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

**МУРКО Е.В.**

Канд. техн. наук, доцент, заведующий аспирантурой АНО ВО «Университет мировых цивилизаций имени В.В. Жириновского», 119049, г. Москва, Россия,  
e-mail: elena6455@mail.ru

При работе обратных гидролопат в угленасыщенных зонах карьерных полей на разрезах Кузбасса возникает ряд вопросов, связанных с определением их наиболее рационального использования. Так, до конца не решены задачи: выбора оптимального режима черпания – верхнее или нижнее в тех или иных горно-геологических условиях; установления граничных условий для погрузки верхней, нижней или на уровне установки экскаватора; не полностью изучены параметры устойчивости экскаватора при работе, например на уступах из разнопрочных пород и ослабленных тектоническими и иными нарушениями, а также ряд иных задач. В данной статье представлены результаты моделирования параметров забойных блоков при работе обратной гидролопаты Komatsu PC 1250 с верхним черпанием и погрузкой в карьерные самосвалы грузоподъемностью 220 т – БелАЗ-7530. Установлено, что параметры забойных блоков при работе гидролопат верхним черпанием необходимо увязывать в том числе с вместимостью кузова применяемого самосвала.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 № 075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» по Комплексной научно-технической программе полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс») в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.



**Ключевые слова:** производительность экскаватора, производительность самосвала, обратная гидравлическая лопата, экскаваторно-автомобильный комплекс, карьерный самосвал, забойный блок, открытые горные работы, угленасыщенная зона, шаг передвижки.

**Для цитирования:** Марков С.О., Дубинкин Д.М., Мурко Е.В. Исследование параметров забойных блоков при выемке наклонных угольных пластов обратными гидролопатами верхним черпанием // Уголь. 2024;(11S): 134-139. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-134-139.

### Abstract

*When operating backhoes in coal-bearing zones of quarry fields at Kuzbass open-pit mines, a number of issues arise related to determining their most rational use. For instance, the problems of choosing the optimum mode of digging – top or bottom digging in those or other mining and geological conditions; establishing the boundary conditions for loading of the upper, lower or at the excavator placement level have not been completely solved; the stability parameters of the excavator when working, for example, on benches made of different-strength rocks and weakened by tectonic and other disturbances, as well as a number of other problems have not been fully studied. This article presents the results of simulation of face blocks parameters when operating Komatsu PC 1250 backhoe with upper digging and loading into dump trucks with carrying capacity of 220 tons – BelAZ-7530. It is established that parameters of bottom-hole blocks at operation of backhoes by top-digging should be linked also with the capacity of the body of the applied dump truck.*

### Keywords

*Excavator productivity, dump truck productivity, backhoe, excavator and truck complex, quarry dump truck, face block, open-pit mining, coal-bearing zone, moving pitch*

### Acknowledgements

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under Agreement № 075-15-2022-1198 dated 30.09.2022 with the Gorbachev Kuzbass State Technical University on complex scientific and technical program of full innovation cycle: “Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life” (the “Clean Coal – Green Kuzbass” Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle) as part of implementing the project “Development and creation of an unmanned shuttle-type mine truck with a payload of 220 tonnes” in terms of research, development and experimental-design work.

### For citation

Markov S.O., Dubinkin D.M., Murko E.V. Research of face block parameters during inclined coal seams excavation by backhoes using upper digging mode. *Ugol'*. 2024;(11S):134-139. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-11S-134-139.

### ВВЕДЕНИЕ

Обработка угленасыщенных зон на разрезах Кузбасса обуславливает необходимость постоянной адаптации комплексов выемочно-погрузочного и транспортного оборудования к изменяющимся горно-геологическим условиям [1, 2, 3, 4]. Невыдержанность параметров залегания пластов зачастую даже в пределах одного уступа приводит к необходимости использования в таких условиях нескольких технологических схем (паспортов) работы экскаваторов – работа может вестись как нижним, наиболее распространенным, так и верхним черпанием, а также с различными вариантами взаимного расположения экскаватора и автосамосвала. В настоящее время основной объем работ, выполняемых обратными гидролопатами, производится с использованием нижнего черпания, однако постоянное усложнение горно-геологических условий способствует более активному применению и верхнего черпания, например при установке экскаватора на промежуточную полку с целью одновременной выемки верхнего и нижнего подступа [5, 6]. С точки зрения такого подхода одной из первоочередных технологических задач является разработка методики определения такого объема забойного блока, отработка которого позволила бы полностью заполнить кузов карьерного самосвала углем или вскрышной породой. Иными словами, объем отрабатываемого забойного блока [7] предлагается приравнять к объему кузова автосамосвала, применяемого в данных конкретных условиях. В данной работе рассмотрен карьерный самосвал грузоподъемностью 220 т. Под забойным блоком, как известно, понимается часть уступа, отрабатываемая по его длине экскаватором с одного места установки при изменении радиуса черпания от минимального до максимального. Именно длина этого блока может быть приравнена к шагу передвижки экскаватора и наоборот, то есть исходя из требуемого равенства объемов забойного блока и кузова самосвала [8, 9], а также учитывая горно-геологические условия, можно определить такой шаг передвижки, при работе с которым кузов самосвала будет полностью заполнен горной массой без оставления каких-либо объемов в забое и без необходимости перемещения экскаватора в новый забой для погрузки горной массы в тот же самосвал. Следует отметить, что физико-механические и физико-технические свойства экскавируемой горной массы [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16] в данной итерации методики принимаются без изменений либо учитываются только косвенно из-за необходимости первоочередного обоснования хотя бы формального подхода к взаимосвязке параметров забойного блока и применяемого карьерного самосвала.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Вынимаемый блок выше уровня установки экскаватора по простиранию пласта, как было установлено авторами ранее, жестко ограничен шагом передвижки экскаватора  $L_{\text{пер}} = 1,81$  м, который и определяет его объем.

Конфигурация забойного блока выше уровня установки экскаватора с учетом перечисленных ограничений приведена на рис. 1.

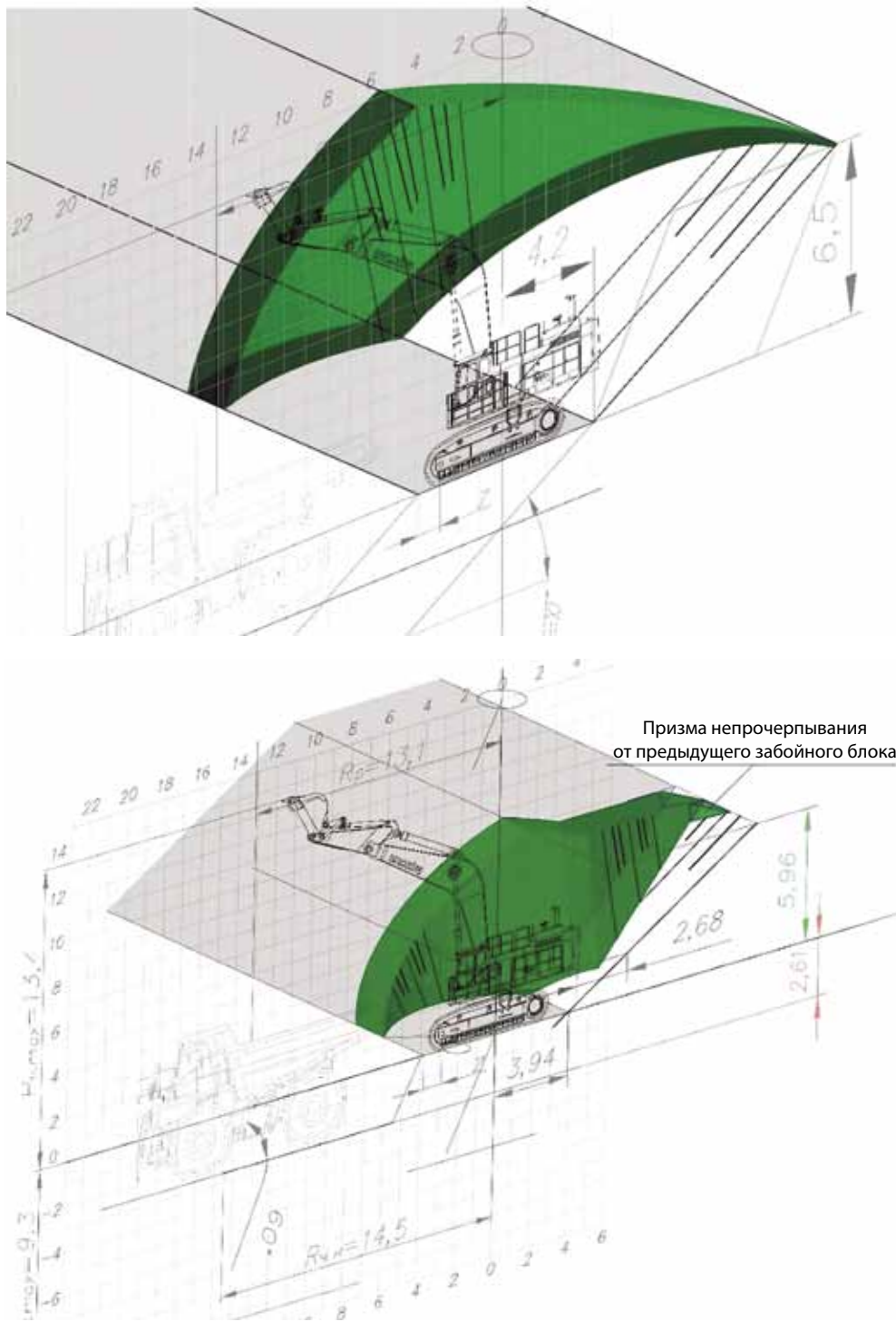


Рис. 1. Геометрия забойного блока выше уровня установки экскаватора: а – на максимальном радиусе черпания  $R_{ч.у \max}$ ; б – на минимальном радиусе черпания  $R_{ч.у \min}$

Fig. 1. The face block geometry above the excavator positioning level: а – at the maximum digging reach  $R_{ч.у \max}$ ; б – at the minimum digging reach  $R_{ч.у \min}$

Из результатов моделирования установлено, что при изменении (увеличении) минимального радиуса черпания на уровне установки экскаватора меняется положение центра масс нижнего забойного блока и увеличивается угол поворота экскаватора на разгрузку, т.е. параметры, определяющие производительность экскаватора. Так, при увеличении минимального радиуса черпания на уровне

установки экскаватора от минимального значения 4,2 до максимального значения 6,7 м угол поворота экскаватора на разгрузку  $\beta_n$  при выемке нижнего забойного блока увеличивается на  $4,4^\circ$  (рис. 2). Данное изменение хорошо аппроксимируется выражением:

$$\beta_n = -0,081R_{ч.у \min}^2 + 2,64R_{ч.у \min} + 61,664, \quad (1)$$



Рис. 2. Изменение горизонтального угла поворота экскаватора  $\beta_n$  между направлением от оси вращения экскаватора на центр масс нижнего забойного блока и направлением на точку разгрузки в зависимости от  $R_{ч.у\ min}$

Fig. 2. Changes in the horizontal angle of excavator rotation  $\beta_n$  between the direction from the axis of the excavator rotation depending on the center of mass of the face block and the direction to the unloading point depending on  $R_{ч.у\ min}$

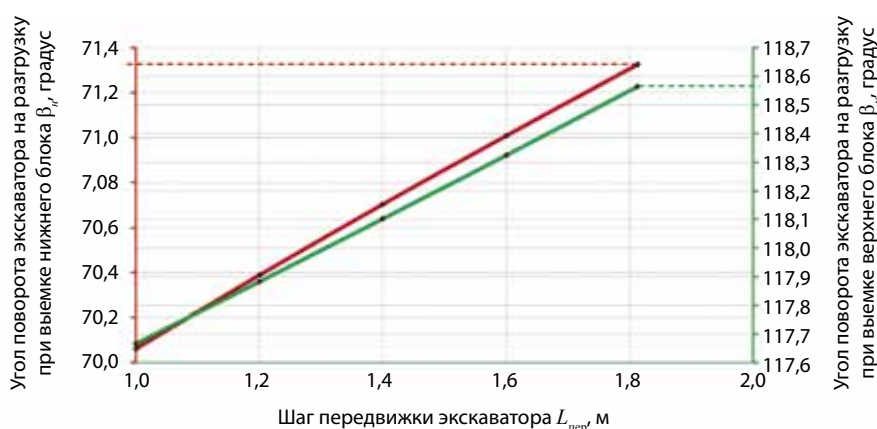


Рис. 3. Изменение углов поворота экскаватора на разгрузку при выемке верхнего и нижнего забойных блоков от шага его передвижки

Fig. 3. Changes in the angles of the excavator rotation for unloading during excavation of the upper and lower face blocks depending on the step of its movement

или более простым выражением:

$$\beta_n = 1,7575R_{ч.у\ min} + 64,01. \quad (2)$$

Объем забойного блока ниже уровня установки экскаватора  $V_n$  при пошаговом увеличении минимального радиуса черпания на уровне установки экскаватора  $R_{ч.у\ min}$  не меняется при постоянном шаге передвижки экскаватора  $L_{пер}$  для выемки каждого последующего блока.

Таким образом, для минимизации потерь времени на погрузку автосамосвала нижним черпанием и сохранения производительности экскаваторно-автомобильного комплекса нецелесообразно увеличение минимального радиуса черпания на уровне установки экскаватора, поскольку это не влияет на вынимаемый объем горной массы [17], но увеличивает угол поворота экскаватора на разгрузку, что приводит к увеличению времени погрузки, потере производительности экскаватора и увеличению времени простоя карьерного самосвала, что, по сути, тоже является потерей его производительности.

При изменении шага передвижки экскаватора происходит изменение горизонтальных углов поворота на разгрузку, а именно их рост при увеличении  $L_{пер}$ , что неблагоприятно сказывается на времени цикла экскаватора и его производительности [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]. Это связано с изменением горизонтальной проекции положе-

ния центра масс вынимаемого блока по отношению к горизонтальным проекциям оси вращения экскаватора и точки разгрузки.

Полученные графические зависимости представлены на рис. 3.

Поскольку выемка верхнего блока жестко увязана с выемкой нижнего блока, то изменение каких-либо параметров первого, кроме  $R_{ч.у\ min}$ , не представляется возможным.

Рассмотрим вариант для максимальной величины  $R_{ч.у\ min}$  (см. рис. 1, а), равной 10 м, и шаге передвижки экскаватора  $L_{пер} = 1,81$  м. Угол поворота на разгрузку верхнего блока в таких условиях фиксируется в значении  $\beta_v = 119^\circ$ , угол откоса забоя неизменен и принят по условиям устойчивости  $60^\circ$ . Общая максимальная высота вынимаемого слоя для данных горно-геологических условий составляет  $H_k + H_ч = 2,5 + 6,5 = 9$  м, где  $H_k$  и  $H_ч$  – высота нижнего и верхнего обрабатываемых слоев соответственно.

Из результатов вычислений установлено, что объем верхнего блока в рассматриваемом случае составляет  $V_v = 93,61$  м<sup>3</sup>, что в сумме с нижним блоком дает суммарный объем  $V = V_v + V_n = 129,9 \approx 130$  м<sup>3</sup> в целом. С учетом среднего коэффициента разрыхления угля  $K_p = 1,35$  суммарный объем отгружаемой горной массы будет равен 175 м<sup>3</sup>.



Согласно паспортным данным карьерного самосвала БЕЛАЗ 7530, вместимость его кузова «с шапкой» 2:1 составляет максимум 147 м<sup>3</sup>.

Выполненные вычисления позволяют сделать вывод о том, что в рассматриваемых горно-геологических и горно-технических условиях (угол залегания пласта – 30°, мощность пласта – 4 м, высота нижнего вынимаемого слоя – 2,5 м, высота верхнего вынимаемого слоя – 6,5 м, работа при выемке верхнего слоя на максимальном значении радиуса черпания  $R_{ч,y\ min}$ , нижняя погрузка, экскаватор Komatsu PC1250, шаг передвижки  $L_{пер} = 1,81$  м, карьерный самосвал БЕЛАЗ 7530 грузоподъемностью 220 т) параметры технологии не позволяют работать экскаватору с максимальной производительностью при выемке каждой пары забойных блоков (верхнего и нижнего), поскольку суммарный вынимаемый объем горной массы превышает вместимость автосамосвала на 24%. В таких условиях работы после окончания выемки очередной пары забойных блоков (верхнего и нижнего) при максимально возможном шаге передвижки экскаватора  $L_{пер} = 1,81$  м в забойных блоках будет оставаться около 24% неотработанного угля. При погрузке следующего автосамосвала это приведет к рассогласованию непрерывной работы экскаватора во времени: сначала будет отработан оставшийся в забойных блоках объем угля, затем экскаватор переместится в новое положение и только после этого закончит погрузку автосамосвала, оставив в следующей «партии» забойных блоков уже 48% неотработанного объема. Такой режим работы приведет к резкому уменьшению производительности как экскаватора, так и автосамосвала из-за увеличения времени технологических простоев.

Возникает вопрос о стабилизации работы экскаваторно-автомобильного комплекса в рассматриваемых условиях, т. е. о подборе таких параметров технологии ведения горных работ, при которых объем вынимаемой без простоев и передвижек горной массы (угля) будет кратен целому числу объемов кузова автосамосвала.

При этом отработка только нижним или только верхним черпанием не рассматривается ввиду невозможности загрузить автосамосвал объемом угля только из верхнего или только из нижнего блока без перемещения экскаватора вдоль оси его хода во время погрузки автосамосвала.

Изменению в данных условиях могут быть подвергнуты:

- высота нижнего блока (глубина черпания  $H_k$ );
- высота верхнего блока (высота черпания  $H_ч$ );
- шаг передвижки экскаватора  $L_{пер}$ .

## Вывод

Увеличение глубины черпания  $H_k$  через увеличение высоты нижнего слоя приведет к «отодвиганию» автосамосвала от экскаватора. При этом будет невозможно обеспечить равномерность и полноту загрузки кузова карьерного самосвала горной массой. Увеличение высоты черпания  $H_ч$  также невозможно, так как при этом в верхней части забоя образуется «козырек» или призма непрочерпывания, что недопустимо по условиям безопасного ведения горных работ или по условию соблюдения норматива потерь полезного ископаемого. Увеличение шага передвижки также невозможно, что ука-

зывалось выше. Исходя из этого, регулирование параметров технологической схемы возможно только в сторону уменьшения вынимаемых объемов горной массы в пределах ее «излишков» в 24%. На основании этого можно утверждать, что наиболее рациональным с точки зрения управления стабильностью работы рассматриваемого экскаваторно-автомобильного комплекса является уменьшение шага передвижки при выемке угля из пласта верхним и нижним черпанием на всю его максимально возможную по техническим параметрам экскаватора мощность продольным ходом.

## Список литературы • References

1. Markov S., Janočko Ju., Tyulenev M., Litvin Ya.O. Perspectives for the Transportless Mining Technology in Siberia and Far East Coal Deposits. *E3S Web of Conferences*. 2019;(105):01021. DOI: 10.1051/e3sconf/201910501021.
2. Марков С.О., Мурко Е.В., Непша Ф.С. Гранулометрический состав отвальных массивов разрезов Кузбасса // Горные науки и технологии. 2021;6(4):259-266. DOI: 10.17073/2500-0632-2021-4-259-266.  
Markov S.O., Murko E.V., Nepsha F.S. Grain size distribution of waste rock masses of Kuzbass coal strip mines. *Gornye nauki i tekhnologii*. 2021;6(4):259-266. (In Russ.).
3. Gvozdkova T., Markov S., Demirel N., Anyona S. Modeling of Three Flat Coal Seams Strata Developing at Open Pit Mining. *E3S Web of Conferences*. 2017;(21):01024. DOI: 10.1051/e3sconf/20172101024.
4. Шаклеин С.В., Писаренко М.В., Рогова Т.Б. Тенденции развития минерально-сырьевой базы угольной промышленности Кузбасса // Техника и технология горного дела. 2024;(1):4-22. DOI: 10.26730/2618-7434-2024-1-4-22.  
Shaklein S.V., Pisarenko M.V., Rogova T.B. Trends in the mineral resource base development of the Kuzbass coal industry. *Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela*. 2024;(1):4-22. (In Russ.). DOI: 10.26730/2618-7434-2024-1-4-22.
5. Об изменении производительности обратных гидравлических лопат при разных схемах погрузки вскрыши в карьерные самосвалы / А.А. Хорешок, Д.М. Дубинкин, Я.О. Литвин и др. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2024;(4):26-34. DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-26-34.  
Khoreshok A.A., Dubinkin D.M., Litvin Ya.O., Markov S.O., Tyulenev M.A. Changes in hydraulic backhoe capacity under different schemes of overburden loading into the dump trucks. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gorniy zhurnal*. 2024;(4):26-34 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2024-4-26-34.
6. Исследование влияния изменения высоты уступа на текущий коэффициент вскрыши при использовании автономных карьерных самосвалов грузоподъемностью 240 т / Д.М. Дубинкин, А.А. Хорешок, Ш.Я. Исмаилова, С.О. Марков // Техника и технология горного дела. 2023;3(22):71-81. DOI: 10.26730/2618-7434-2023-3-71-81.  
Dubinkin D.M., Khoreshok A.A., Ismailova S.Ya., Markov S.O. Study of the influence of the bench height change on the current stripping ratio when using autonomous quarry dump trucks with payload capacity of 240 tons. *Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela*. 2023;(3):71-81 (In Russ.). DOI: 10.26730/2618-7434-2023-3-71-81.
7. Об определении параметров забойных блоков при ведении горных работ обратными гидравлическими лопатами / О.И. Литвин, Я.О. Литвин, М.А. Тюленев и др. // Горная промышленность. 2021;(6):76-81. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-76-81.

- Litvin O.I., Litvin Ya.O., Tyulenev M.A., Markov S.O. On determining the parameters of face blocks during mining operations with backhoes. *Gornaya promyshlennost'*. 2021;(6):76-81. (In Russ.). DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-76-81.
8. Дубинкин Д.М., Ялышев А.В. Влияние процесса погрузки угля в грузовую платформу на коэффициент использования грузоподъемности карьерного самосвала БелАЗ-7530 (220 т) // Уголь. 2023;(S12):11-19. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-11-19.  
Dubinkin D.M., Yalyshev A.V. The effect of the coal loading process on the loading platform on the utilization factor of the BelAZ-7530 220-ton mining dump truck. *Ugol'*. 2023;(S12):11-19. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-11-19.
9. Дубинкин Д.М., Ялышев А.В. Определение параметров модели угля для имитационного моделирования погрузки и разгрузки грузовой платформы карьерного самосвала // Уголь. 2023;(S12):4-10. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-4-10.  
Dubinkin D.M., Yalyshev A.V. Determination of parameters of the coal model for simulation of loading and unloading of the cargo platform of a quarry dump truck. *Ugol'*. 2023;(S12):4-10. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-S12-4-10.
10. Study of inclined deposits opening under the combined mining system: Kureinsky area case-study / V.L. Martyanov, S.O. Markov, V.F. Kolesnikov et al. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2021;(4):64-88. DOI: 10.26730/2618-7434-2021-4-64-88.
11. Методика определения зон нарушений пластов для повышения достоверности данных геологоразведки / С.М. Мильй, М.А. Рожено, К.А. Прокопенко и др. // Техника и технология горного дела. 2019;(2):4-18. – DOI: 10.26730/2618-7434-2019-2-04-18.  
Milyj S.M., Rozhenko M.A., Prokopenko K.A., Korotkova G.I. Methodology for identifying seams disturbance zones to increase the reliability of exploration data. *Tekhnika i tekhnologiya gornogo dela*. 2019;(2):4-18. (In Russ.). DOI: 10.26730/2618-7434-2019-2-04-18.
12. Novinkov A., Protasov S., Samusev P. Ensuring Seismic Safety of Underground Mines During Blasting Operations in Combined Surface-Underground Deposit Development. *E3S Web of Conferences*. 2020;(174):01016. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401016.
13. On the need to consider the lithological composition of overburden rocks in the design of waste water treatment plants at open pit mines / E. Murko, Ju. Janočko, E.V. Makridin et al. *E3S Web of Conferences*. 2021;(315):02013. DOI: 10.1051/e3sconf/202131502013.
14. Using of Shell Filtering Constructions for Concentrating Plant's Coal Slurry Dewatering / E. Murko, V. Kalashnikov, A. Gorbachev et al. *E3S Web of Conferences*. 2019;(105):02029. DOI: 10.1051/e3sconf/201910502029.
15. Ulewicz R., Krstić B., Ingaldi M. Mining Industry 4.0 – Opportunities and Barriers. *Acta Montanistica Slovaca*. 2022;27(2):291-305.
16. Kozel R., Bělca J., Kempa F., Chlopečký J., Grycz O., Cehlár M. Waste management systems in the context of sustainability. *Acta Montanistica Slovaca*. 2024;29(1):180-192. DOI: 10.46544/AMS.v29i1.16.
17. Определение области энергоэффективного положения рабочего оборудования и эффективного радиуса черпания гидравлических экскаваторов на открытых горных работах / О.И. Литвин, С.О. Марков, А.А. Хорешок и др. // Маркшейдерия и недропользование. 2022;4(120):38-44. DOI: 10.56195/20793332-2022-4-38.
- Litvin O.I., Markov S.O., Khoreshok A.A., Lapaev M.N., Tyulenev M.A. Determination of the area of energy-efficient position of working equipment and effective digging radius of hydraulic excavators at open pit mining. *Markshejderiya i nedropolzovanie*. 2022;4(120):38-44. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332-2022-4-38.
18. Janosevic D., Mitrev R., Andjelkovic B., Petrov P. Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency. *Journal of Zhejiang University: Science A*. 2012;13(12):926-942. DOI: 10.46544/AMS.v27i2.02.
19. Mitrev R., Janošević D., Marinković D. Dynamical modelling of hydraulic excavator considered as a multibody system. *Tehnicki Vjesnik*. 2017;(24):327-338. DOI: 10.17559/TV-20151215150306.
20. Zou Z., Pang X., Chen J. Comprehensive theoretical digging performance analysis for hydraulic excavator using convex polytope method. *Multibody Syst Dyn*. 2019;(47):137-164. DOI: 10.1007/s11044-019-09686-0.
21. Azure J., Ayawah P., Kaba A. et al. Hydraulic Shovel Digging Phase Simulation and Force Prediction Using Machine Learning Techniques. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2021;(38). DOI: 10.1007/s42461-021-00486-9.
22. Tyulenev M., Markov S., Zhironkin S. et al. The Choice of Technology and Equipment for Coal Seams of Different Bedding Excavation at Kuzbass Surface Mines Based on Digging Capacity and Unit Costs. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021;26(4):603-619. DOI: 10.46544/AMS.v26i4.02.
23. Klement'eva I.N., Kuziev D.A. Actual status and prospects for future development of surface miners, designed for blastless lit-by-lit excavation of solid rock. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(2):123-128. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-02-0-123-128.
24. Mishra P.C., Mohanty M.K. A review of factors affecting mining operation. *World Journal of Engineering*. 2020;17(3):457-472. DOI: 10.1108/WJE-03-2019-0082.

#### Authors Information

**Markov S.O.** – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of Open Pit Mining Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: markovso@kuzstu.ru

**Dubinkin D.M.** – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mining Machines and Complexes, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

**Murko E.V.** – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Postgraduate Department, V.V. Zhirinovskiy University of World Civilizations, Moscow, 119049, Russian Federation, e-mail: elena6455@mail.ru

#### Информация о статье

Поступила в редакцию: 15.09.2024

Поступила после рецензирования: 21.10.2024

Принята к публикации: 31.10.2024

#### Paper info

Received September 15, 2024

Reviewed October 21, 2024

Accepted October 31, 2024