

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ КАРЬЕРНЫХ ГРУЗОВ ПО ТРАЕКТОРИИ СПУСКА МАКСИМАЛЬНО ПРИБЛИЖЕННОЙ К БРАХИСТОХРОННОЙ КРИВОЙ

Великанов В.С.¹, Дёрина Н.В.², Мамай Н.В.¹

¹*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург;*

²*Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск*

Ключевые слова: карьер, транспорт, карьерный автосамосвал, производительность, крупность, кривая, добыча, экология.

Аннотация. Проблемы энергоэффективности, энергосбережения и охраны окружающей среды приобретают особую значимость в вопросах перемещения и доставки грузов на открытых горных работах. При значительных глубинах работа внутрикарьерного транспорта сопряжена с определенными недостатками, а именно: увеличиваются расстояния транспортирования горной массы на поверхность; из общей длины транспортных коммуникаций резко возрастает составляющая подъема горной массы; возникает необходимость применения нескольких видов транспорта для более рационального разделения функций; ограниченность фронта работ затрудняет маневренность при производстве транспортных операций; происходит более частое перемещение транспортных коммуникаций, пунктов перегрузки внутри карьера; усложняются обслуживание и ремонт транспортных средств, вызванные нецелесообразностью выдачи всего оборудования на поверхность. В работе решается задача организации инновационного способа доставки карьерных грузов при открыто-подземном способе добычи.

INVESTIGATING THE POSSIBILITY OF TRANSPORTING QUARRY LOADS ALONG A DESCENT TRAJECTORY AS CLOSE AS POSSIBLE TO A BRACHIESTOCHRONOUS CURVE

Velikanov V.S.¹, Derina N.V.², Mamay N.V.¹

¹*Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg;*

²*Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk;*

Keywords: quarry, transport, dump truck, productivity, coarseness, curve, extraction, ecology.

Abstract. Energy efficiency, energy conservation and environmental protection issues are of particular importance for the movement and delivery of goods in open pit mining operations. At considerable depths the operation of in-pit transport is associated with certain disadvantages, namely: the distance of transporting rock mass to the surface increases; the component of rock mass lifting increases sharply from the total length of transport communications; there is a need to use several types of transport for a more rational division of functions; the limited work front makes maneuverability during transport operations difficult; more frequent relocation of transport communications and in-pit reloading points occurs; the maintenance and repair of vehicles are complicated due to the impracticality of releasing all equipment to the surface. The work solves the problem of the innovative way organization for delivery of open-pit cargoes at open-underground method of mining.

Введение

Транспортирование горной массы и карьерных грузов на открытых горных работах является важнейшим звеном единого технологического процесса добычи полезных ископаемых [1-4]. К основным видам технологического транспорта, применяемого в процессе транспортировки при добыче полезных ископаемых открытым способом, принято относить автомобильный карьерный транспорт, железнодорожный и конвейерный транспорт, применяемые самостоятельно или в различных комбинациях, а также используемые специальные транспортные средства [5-8]. Дальнейшее освоение запасов полезных ископаемых открытым способом ведется глубокими карьерами с текущей глубиной 300-500

м и более, для многих горных предприятий рассматривается перспектива перехода на комбинированный (открыто-подземный) способ разработки. Поэтому, объективной закономерностью для глубоких карьеров является увеличение сложности трассы с ростом глубины разработки, увеличение дальности перемещения полезного ископаемого и грузов и высоты подъема, ростом средневзвешенных уклонов и ограничением пропускной способности внутрикарьерных транспортных коммуникаций.

На ближайшую перспективу все-таки основным видом карьерного транспорта останутся классические карьерные автосамосвалы с дизельным двигателем. Необходимо отметить следующее, что основными наиболее значимыми факторами, влияющими на работу карьерных автосамосвалов, являются: расстояние транспортирования горной массы L ; скорость движения v ; время движения за 1 рейс $t_{пер}$. В работах [9-14] получены регрессионные модели зависимости производительности Q от перечисленных выше факторов, которые графически представлены на рисунках 1-4. Совместное влияние факторов оказывает значимое влияние на производительность самосвалов и, следовательно, на эффективность транспортного процесса.

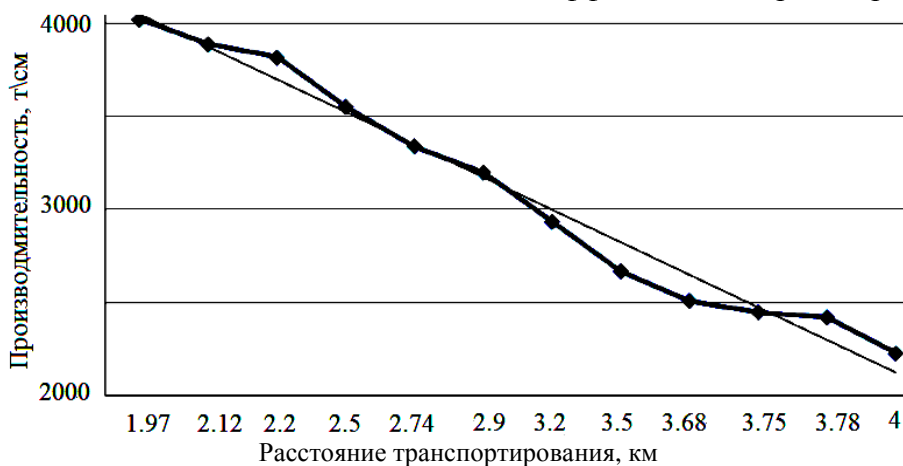


Рис. 1. Зависимость производительности от расстояния транспортирования

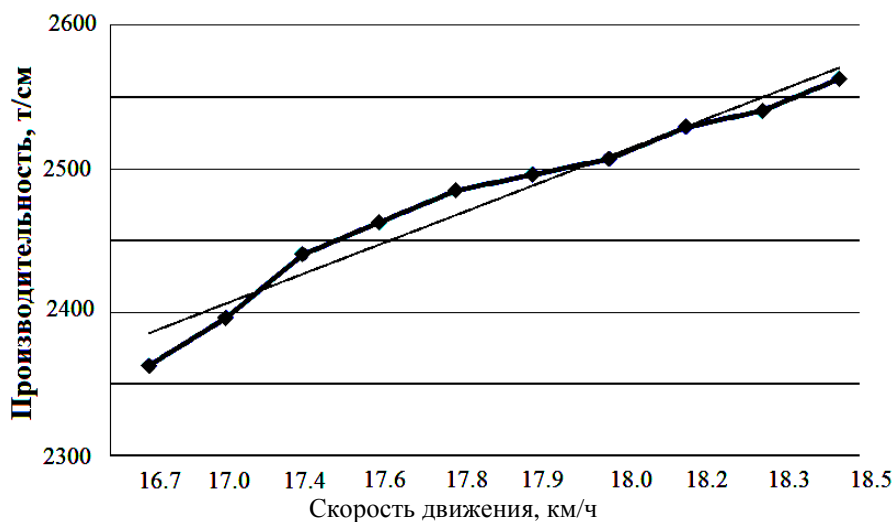


Рис. 2. Зависимость производительности от скорости движения

Теория вопроса

Карьерный автотранспорт оказывает наибольший вклад в загрязнение атмосферы карьеров, переход горных работ на глубокие горизонты приводит к осложнению их проветривания. Поэтому для горнодобывающих предприятий приоритетными направлениями в области совершенствования транспорта глубоких карьеров является использование новых видов транспортного оборудования, которое минимизирует риски вредного влияния на окружающую среду при его эксплуатации. Нами предлагается для снижения вредного влияния автотранспорта на экологию карьеров и минимизацию затрат на спуск оборудования

и материалов, как для открытых горных работ, так и для комбинированного способа разработки в качестве оригинального технического решения использовать комплекс оборудования для спуска карьерных грузов по трассе, максимально приближенной к брахистохроне (табл. 1) [15-18].

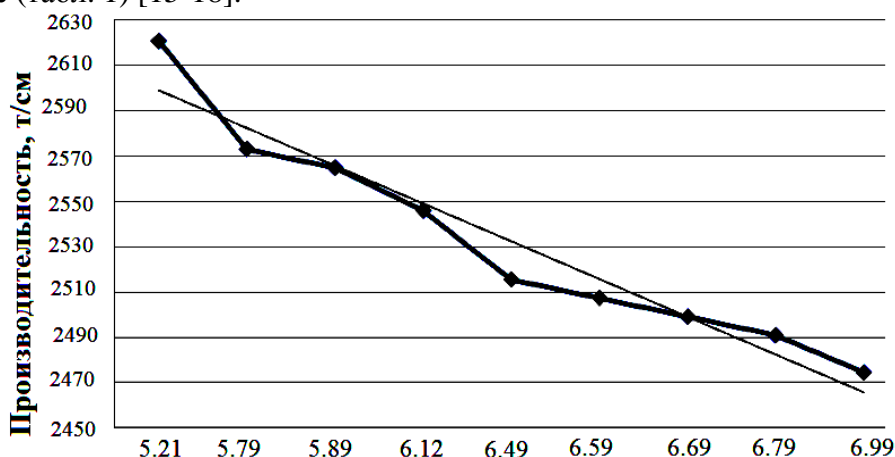


Рис. 3. Зависимость производительности от времени операций с самосвалом

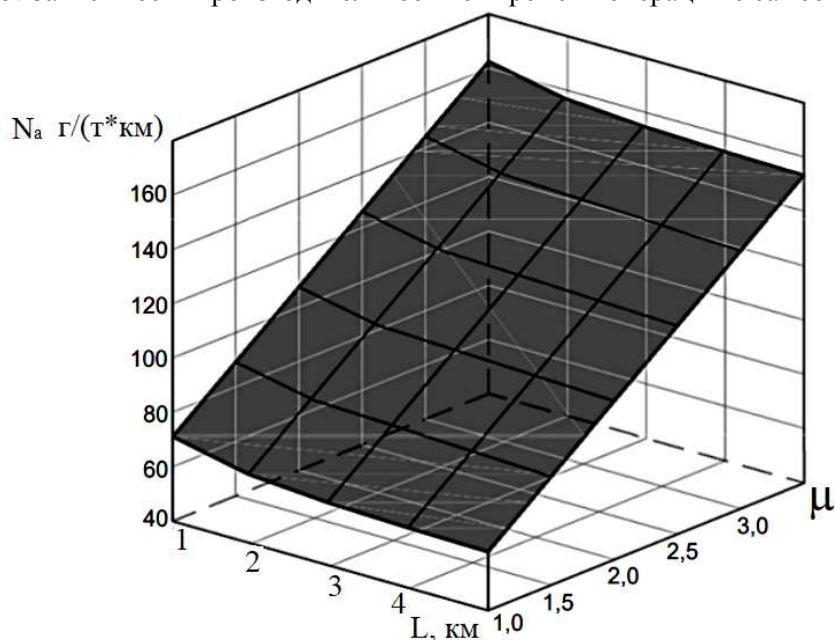


Рис. 4. Зависимость нормы расхода топлива от расстояния транспортирования и коэффициента сложности трассы (автосамосвал Cat-785В, Удачинский ГОК АК «АЛРОСА» (ПАО)) [13]

Табл. 1. Аналитические зависимости для установления основных характеристик спуска карьерных грузов

Характеристика	Зависимость
длина брахистохроны в пределах одной арки циклоиды	$S = \left -4r \cos \frac{\Phi}{2} \right _{\Phi_1}^{\Phi_2}$
время спуска по брахистохроне	$T = \left \sqrt{\frac{r}{g}} \Phi \right _{\Phi_1}^{\Phi_2}$
текущее значение скорости спуска	$v_{\text{брах}} = 2 \sin \frac{\Phi}{2} \sqrt{gr}$
ускорение, вызывающее движение тела в гравитационном спуске по брахистохроне	$a_{\text{брах}} = g \cos \frac{\Phi}{2}$

Результаты моделирования

Брахистохрона задается следующей системой уравнений в параметрическом виде:

$$\begin{cases} x = r\varphi - r \sin \varphi, \\ y = -(r - r \cos \varphi) + 2r, \end{cases} \quad (1)$$

где r – радиус производящей окружности, $\varphi \in [0; \pi]$ – параметр, угол поворота производящей окружности.

Здесь слагаемое $2r = h$ (высота верхней точки кривой) задает смещение циклоиды по оси y так, чтобы вся кривая лежала в I-й четверти.

Поставленная задача – определение времени спуска по заданной траектории – предполагает получение зависимости $t(r, \varphi_1, \varphi_2)$ в аналитическом виде. В связи с этим выбран численный метод, суть которого – провести симуляцию с разбиением кривой трассы на множество (порядка 100-1000) прямолинейных сегментов. Движение на каждом сегменте рассматривается и рассчитывается как равноускоренное движение по наклонной плоскости.

Метод численного расчета позволяет довольно гибко построить брахистохрону с различными начальными углами, выполнить симуляцию и провести анализ полученных результатов, обеспечивая при этом достаточный уровень точности [19-24]. Для этих численных расчетов были написаны алгоритмы на языке Python.

Построение точек трассы. Точки трассы, изначально строятся в соответствии с системой уравнений (1) для значений параметра φ от 0 до π рад включительно с шагом 0,005-0,0005 рад, что соответствует 600-6000 прямолинейным сегментам, и при $r = 1$ м (то есть высота верхней точки трассы получается равной 2м). Полученные координаты точек хранятся в виде массива пар чисел.

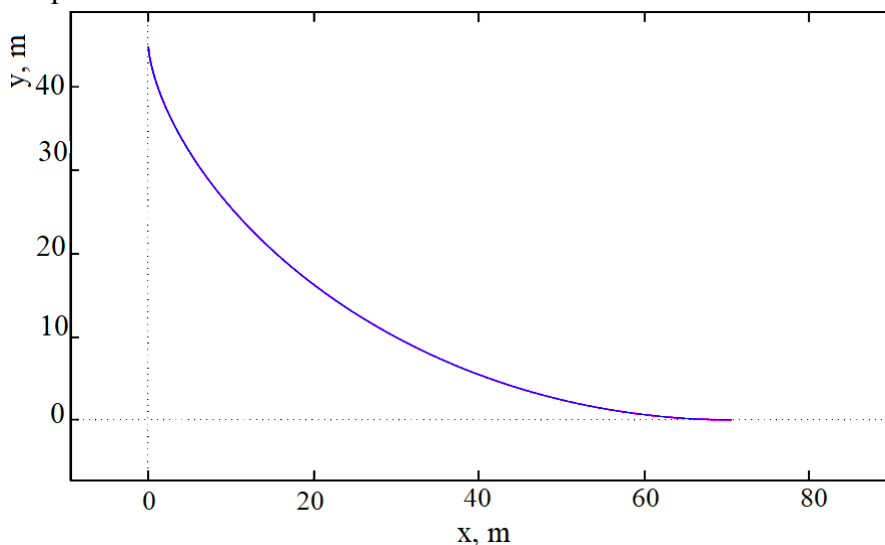


Рис. 5. Брахистохрона, сгенерированная по 6283 точкам с $r = 22,5$ м

Далее в зависимости от условий каждой конкретной расчетной задачи выполняются следующие алгоритмы: находится точка кривой, касательная к которой образует заданный угол с горизонталью. Точнее, берется начальная точка такого прямолинейного отрезка трассы, который расположен под этим углом; выполняется «обрезка» изначальной полной трассы по точкам, соответствующим углам наклона касательной; «обрезанная» кривая переносится в начало координат так, чтобы крайняя левая точка кривой лежала на оси Oy , а крайняя нижняя – на оси Ox ; выполняется масштабирование кривой.

Необходимость изучения влияния начального угла на параметры трассы и движения по ней диктуется сложностями конструирования такой трассы на практике с вертикальным начальным участком [13-15]. Конструкция системы оказалась бы проще, если перед траекторией спуска был бы горизонтальный участок, плавно переходящий в спуск. Более того, при применении данной трассы в карьерах было бы необходимо помимо значительного укрепления грунта сооружение поддерживающей металлоконструкции.

Расчеты проводились при начальных углах трассы α_1 от 20° до 90° , но с постоянным конечным углом, равным $\alpha_2 = 0^\circ$.

В абсолютных значениях время спуска t (рис. 6) с уменьшением начального угла α_1 с 90° до 50° возрастает с 4,5 с до 6 с (+33%). При дальнейшем уменьшении начального угла время спуска и длина трассы (рис. 7) резко возрастают.

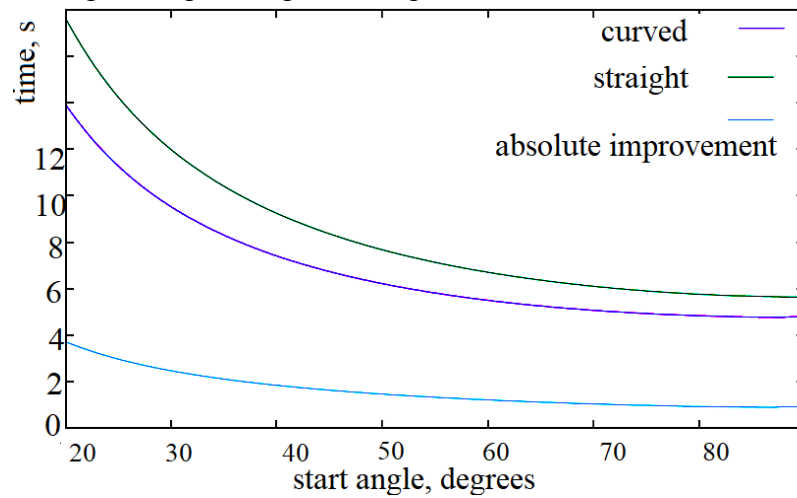


Рис. 6. Зависимость времени спуска от начального угла

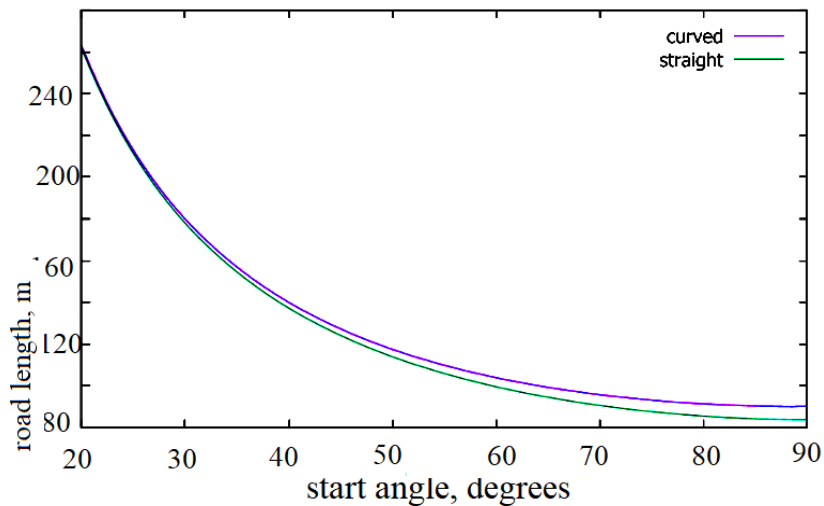


Рис. 7. Длина трассы в зависимости от начального угла

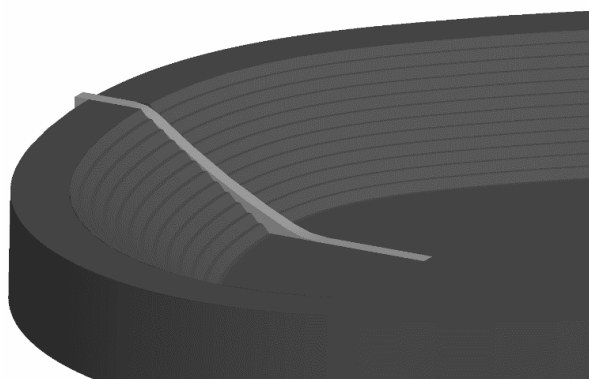


Рис. 8. Предварительная модель трассы спуска в карьере с начальным углом 40° и конечным углом $\approx 23^\circ$; угол откоса уступа карьера 50°

Выводы:

– на этапе предварительной оценки возможностей трассы спуска приближенной к брахистохронной кривой показало сокращение времени доставки и длины трассы

перемещения, так например, при глубине карьера 200 м ориентировочная длина автомобильной трассы (расчет по формуле Ржевского В.В.) – 3250 м, при трассе спуска по кривой приближенной к брахистохроне – 282 м.

– предлагаемое техническое решение вопроса по доставке карьерных грузов обеспечит возможность повышения эффективности производства, производительности и безопасности труда, а также приведет к сокращению энергозатрат на транспортирование карьерных грузов.

Список литературы

1. Галкин В.И., Шешко Е.Е. Проблемы совершенствования транспортных систем в горной промышленности России // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – №1. – С. 485-507.
2. Бурмистров К.В., Осинцев Н.А. Принципы устойчивого развития горнотехнических систем в переходные периоды // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – №4. – С. 179-195.
3. Шешко О.Е. Эколого-экономическое сравнение применения в глубоких карьерах дизель-троллейбусов и циклично-поточной технологии // Научный вестник Московского государственного горного университета. – 2013. – №5. – С. 108-116.
4. Тарасов П.И. Особенности создания и применения на открытых горных работах специализированных транспортных средств // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – №8. – С. 39-51.
5. Шабанов А.А., Великанов В.С. Обзор исследований и перспективные направления в эргономическом обеспечении проектирования горных машин и комплексов // Вестник КузГТУ. – 2013. – №6. – С. 46-50.
6. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Korotkova A.N., Dyorina K.S. The challenges of Industry 4.0 and the need for new answers in the mining industry // Известия Уральского государственного горного университета. 2021. № 2(62). pp. 154-166. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-2-154-166.
7. Mulukhov K.K., Beslekoeva Z.N. Retrofitting of steep angle conveyor hoist for coarse cargo in deep open pit mines // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2018, no. 4, pp. 179-188.
8. Великанов В.С., Гуров М.Ю. Развитие научно-методологических основ совершенствования карьерных экскаваторов на базе нечетко – множественного подхода. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2018. – 217 с.
9. Довженок А.С., Ковалев М.Н. Технологический аудит параметров работы карьерного автотранспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – №4. – С. 252-256.
10. Анистратов, К.Ю., Борщ-Компонице Л.В. Исследование показателей работы карьерных самосвалов для обоснования структуры парка и норм выработки автотранспорта // Горная промышленность. – 2011. – №4. – С. 38-49.
11. Гаравский А.О., Бондарев И.Ф. Критерии эффективности использования карьерного автотранспорта // Горная промышленность. – 2002. – №6. – С. 47-48.
12. Вуейкова О.Н., Ларин О.Н. Вопросы повышения эффективности работы карьерного автотранспорта // Вестник ОГУ. – 2011. – №10(129). – С. 20-25.
13. Лель Ю.И., Зырянов И.В., Ильбульдин Д.Х., Мусихина О.В., Глебов И.А. Методика нормирования расхода топлива автосамосвалами в глубоких карьерах // Известия Уральского государственного горного университета. – 2017. – Вып. 4(48). – С. 66-71. –DOI: 10.21440/2307-2091-2017-4-66-71.
14. Лель Ю.И., Глебов И.А., Мусихина О.В. Энергетический метод оценки и систематизации условий эксплуатации карьерного автотранспорта // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2020. – №8. – С. 14-25.
15. Новожилов Б.М. Исследование траектории спуска в агрегатах экстренной эвакуации космонавтов на стартовых комплексах // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2019. – №10(94). – С. 1-13.
16. Зароднюк А.В., Черкасов, О.Ю. Качественный анализ оптимальных траекторий движения материальной точки в сопротивляющейся среде и задача о брахистохроне // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2015. – №1. – С. 41-49.
17. Белоцерковская, И.Е., Ефимова, Э.В., Втюрин, М.Ю. Решение задачи о брахистохроне с помощью электронных таблиц в рамках программы дополнительного образования // Информатизация образования: проблемы и перспективы: сборник научных статей IV Всероссийской науч.-практич. интернет конференции, посвященной памяти Д.Ш. Матроса. – Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2018. – С. 8-18.
18. Зароднюк А.В., Черкасов О.Ю. Качественный анализ оптимальных траекторий движения материальной точки в сопротивляющейся среде и задача о брахистохроне // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2015. – №1. – С. 41-49.
19. Великанов В.С., Усов И.Г., Абдрахманов А.А., Усов И.И. Моделирование и оптимизация режимов работы горных машин с использованием среды MATLAB // Горный журнал. – 2017. – №12. – С. 78-81.
20. Великанов В.С., Панфилова О.Р. Усов И.Г. Анализ показателей долговечности рукоятки карьерного экскаватора // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2018. – Т. 16, №4. – С. 13-20. – DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-13-20.

21. Цветков В.Я. Интегральное управление высокоскоростной магистралью // Мир транспорта. – 2013. – №5(49). – С. 6-9.
22. Velikanov V.S., Derina N.V., Abdrakhmanov A.A. Methods and means for the in-house training of mining machine operators // MATEC Web of Conferences. 2017, p. 06004. DOI 10.1051/mateconf/201712906004.
23. Дзюба Ю.В., Охотников А.Л. Мобильное управление подвижными объектами // Наука и технологии железных дорог. – 2018. – №1(5). – С. 16-25.
24. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Antropova L.I., Zalavina T.Yu. About one of the factors determining the failure rate in the working equipment of mining excavators // Journal of Physics: Conference Series. 2019, p. 44067.

References

1. Galkin V.I., Sheshko E.E. Problems of improving transport systems in the mining industry in Russia // Mining Information and Analytical Bulletin. 2011, no. 1, pp. 485-507.
2. Burmistrov K.V., Osintsev N.A. Principles of sustainable development of mining systems in transitional periods // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. 2020, vol. 331, no. 4, pp. 179-195.
3. Sheshko O.E. Ecological and economic comparison of the use of diesel trolley cars and cyclic-flow technology in deep quarries // Scientific Bulletin of the Moscow State Mining University. 2013, no. 5, pp. 108-116.
4. Tarasov P.I. Peculiarities of creation and application of specialized vehicles in open pit mining // Mining Information and Analytical Bulletin. 2008, no. 8, pp. 39-51.
5. Shabanov A.A., Velikanov V.S. Review of research and perspective directions in ergonomic support for the design of mining machines and complexes // Bulletin of KuzSTU. 2013, no. 6, pp. 46-50.
6. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Korotkova A.N., Dyorina K.S. The challenges of Industry 4.0 and the need for new answers in the mining industry // Известия Уральского государственного горного университета. 2021. № 2(62). pp. 154-166. DOI: 10.21440/2307-2091-2021-2-154-166.
7. Mulukhov K.K., Beslekoeva Z.N. Retrofitting of steep angle conveyor hoist for coarse cargo in deep open pit mines // Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal). 2018, no. 4, pp. 179-188.
8. Velikanov V.S., Gurov M.Yu. Development of scientific and methodological foundations for improving mining excavators based on a fuzzy-multiple approach. – Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University n.a. G.I. Nosov, 2018. – 217 p.
9. Dovzhenok A.S., Kovalev M.N. Technological audit of the operation parameters of open-pit vehicles // Mining Information and Analytical Bulletin. 2005, no. 4, pp. 252-256.
10. Anistratov K.Yu., Borshch-Komponiec L.V. Study of the performance indicators of mining dump trucks to justify the structure of the fleet and the norms for the production of vehicles // Mining industry. 2011, no. 4, pp. 38-49.
11. Garavsky A.O., Bondarev I.F. Criteria for the effectiveness of the use of quarry vehicles // Mining industry. 2002, no. 6, pp. 47-48.
12. Vueikova O.N., Larin O.N. Issues of improving the efficiency of career vehicles // Bulletin of the OSU. 2011, no. 10(129), pp. 20-25.
13. Lel Yu.I., Zyryanov I.V., Ilbuldin D.Kh., Musikhina O.V., Glebov I.A. Methodology for normalizing fuel consumption by dump trucks in deep quarries // Proceedings of USMU. 2017, iss. 4(48), pp. 66-71. DOI: 10.21440/2307-2091-2017-4-66-71.
14. Lel Yu.I., Glebov I.A., Musikhina O.V. Energy method for assessing and systematizing the operating conditions of open-pit vehicles // News of higher educational institutions. Mining Journal. 2020, no. 8, pp. 14-25.
15. Novozhilov B.M. Study of the descent trajectory in the units of emergency evacuation of astronauts at launch complexes // Engineering Journal: Science and Innovations. 2019, no. 10(94), pp. 1-13.
16. Zarodnyuk A.V., Cherkasov O.Yu. Qualitative analysis of optimal trajectories of motion of a material point in a resisting medium and the brachistochrone problem // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems. 2015, no. 1, pp. 41-49.
17. Belotserkovskaya, I.E., Efimova, E.V., Vtyurin, M.Yu. Solving the problem of brachistochrone using spreadsheets in the framework of the program of additional education // Informatization of education: problems and prospects: collection of scientific articles of the IV All-Russian scientific and practical. Internet conference dedicated to the memory of D.Sh. Matros. – Chelyabinsk: South-Ural pub. house state human-ped. university, 2018. – P. 8-18.
18. Zarodnyuk A.V., Cherkasov O. Yu. Qualitative analysis of optimal trajectories of motion of a material point in resisting medium and the brachistochrone problem // Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems. 2015, no. 1, pp. 41-49.
19. Velikanov V.S., Usov I.G., Abdrakhmanov A.A., Usov I.I. Modeling and optimization of operating modes of mining machines using the MATLAB environment // Mining Journal. 2017, no. 12, pp. 78-81.
20. Velikanov V.S., Panfilova O.R. Usov I.G. Analysis of indicators of durability of the handle of a mining excavator // Bulletin of the Magnitogorsk State Technical University n.a. G.I. Nosov. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 13-20. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-13-20.
21. Tsvetkov V.Ya. Integral control of a high-speed highway // World of transport. 2013, no. 5(49), pp. 6-9.
22. Velikanov V.S., Derina N.V., Abdrakhmanov A.A. Methods and means for the in-house training of mining machine operators // MATEC Web of Conferences. 2017, p. 06004. DOI 10.1051/mateconf/201712906004.

23. Dziuba Yu.V., Okhotnikov A.L. Mobile control of moving objects // Science and technology of railways. 2018, no. 1(5), pp. 16-25.
24. Velikanov V.S., Dyorina N.V., Antropova L.I., Zalavina T.Yu. About one of the factors determining the failure rate in the working equipment of mining excavators //Journal of Physics: Conference Series. 2019, p. 44067.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры подъемно-транспортных машин и роботов машиностроения	Velikanov Vladimir Semenovich – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of lifting and handling machines and robots
Дёрина Наталья Владимировна – кандидат филологических наук, доцент кафедры иностранных языков по техническим направлениям	Derina Natalja Vladimirovna – candidate of philological sciences, associate professor of the Department of foreign languages in engineering
Мамай Никита Валерьевич – студент rizhik_00@mail.ru	Mamay Nikita Valerievich – student

Получена 18.11.2022