

УДК 622.23.05 © Ю.Е. Воронов, А.Ю. Воронов, Д.М. Дубинкин✉,
О.С. Максимова, 2024

UDC 622.23.05 © Yu.E. Voronov, A.Yu. Voronov, D.M. Dubinkin✉,
O.S. Maksimova, 2024

Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева (КузГТУ), 650000, г. Кемерово, Россия
✉ e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Kuzbass State Technical University,
Kemerovo, 650000, Russian Federation
✉ e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Оптимизация показателей работы роботизированного экскаваторно-автомобильного комплекса разреза*

Optimizing the performance indicators of an autonomous shovel-truck system at an open-pit coal mine

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-7-62-67>

ВОРОНОВ Ю.Е.

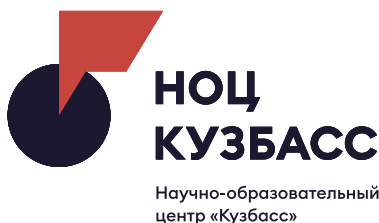
Доктор техн. наук, профессор,
главный научный сотрудник научного
центра «Цифровые технологии»
Кузбасского государственного технического
университета им. Т.Ф. Горбачева (КузГТУ),
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: vyue.ap@kuzstu.ru

ВОРОНОВ А.Ю.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры ЭА
Кузбасского государственного технического
университета им. Т.Ф. Горбачева (КузГТУ),
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: voronovayu@kuzstu.ru

Системы роботизированных грузовых перевозок с удаленным управлением уже давно используются на открытых горных работах за рубежом. Использование беспилотных автосамосвалов в составе автотранспортных парков карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК), согласно результатам исследований и их практической апробации, показало преимущества роботизированных ЭАК по сравнению с обычными. Сравнительная оценка качества функционирования обычных и роботизированных ЭАК показала, что качество работы ЭАК всех разрезов в роботизированном варианте выше действующих ЭАК от 12 до 59%, составляя в целом 42%. Это свидетельствует о значительном повышении качества функционирования ЭАК при использовании в составе автотранспортных парков ЭАК разрезов беспилотных автосамосвалов. Еще больший эффект дает оптимизация показателей работы роботизированных ЭАК. В работе использованы стандартные приемы оптимизации параметров, методы статистической обработки данных,

* 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» Комплексной научно-технической программы 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.



анализа и синтеза. Установлена степень повышения качества работы ЭАК от оптимизации показателей его работы.

Ключевые слова: карьер, экскаваторно-автомобильный комплекс, беспилотный карьерный автотранспорт, показатели работы, оптимизация.

Для цитирования: Оптимизация показателей работы роботизированного экскаваторно-автомобильного комплекса разреза / Ю.Е. Воронов, А.Ю. Воронов, Д.М. Дубинкин и др. // Уголь.2024;(7):62-67. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-62-67.

Abstract

Remotely controlled autonomous material transportation systems have long been used in open-pit mining operations abroad. The use of unmanned haul trucks as part of motor transport fleets in mining shovel-truck systems (STS), according to the results of research and their practical testing, has shown the advantages of autonomous STSs compared to conventional ones. A comparative assessment of the operation quality of conventional and autonomous STSs showed that the STS operation quality at all mines in the autonomous version is higher than the existing STSs from 12% to 59%, amounting to 42% in total. This indicates a significant increase in the STS operation quality when unmanned trucks are used as part of STS vehicle fleets. An even greater effect is achieved by optimizing the performance of autonomous STSs. The work used standard methods of parameter optimization, methods of statistical data processing, analysis and synthesis. The degree to which the STS operation quality can be improved by optimizing its performance indicators has been established.

Keywords

Open-pit mine; shovel-truck system; unmanned mining motor transport; performance indicators; optimization.

For citation

Voronov Yu.E., Voronov A.Yu., Dubinkin D.M., Maksimova O.S. Optimizing the performance indicators of an autonomous shovel-truck system at an open-pit coal mine. *Ugol'*. 2024;(7):62-67. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-7-62-67.

Acknowledgements

This work was done with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under the agreement dated 30.09.2022 № 075-15-2022-1198 with FSBEI HE "T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University" Integrated scientific and technical program of the full innovation cycle "Development and implementation of a set of technologies in the areas of exploration and mining of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing of coal raw materials with a consistent reduction of the environmental impact and risks to human life" (CSTP "Clean Coal – Green Kuzbass") in the implementation of the event "Development and creation of unmanned shuttle-type dump truck of 220 tons carrying capacity" in terms of research and development works.

ВВЕДЕНИЕ

Оптимизация работы ЭАК с использованием в качестве автотранспорта беспилотных автомобилей проводилась в сравнении с работой действующих разрезов УК «Кузбассразрезуголь». Оптимизация базируется на сводных отчетах о работе ЭАК действующих разрезов Компании и результатах оценки качества этой работы в сравнении с беспилотным вариантом, проведенной в работе [1]. В исследовании сохранены все данные по результатам работы автотранспорта по безлюдной технологии, приведенные другими авторами [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] и использованные в работе [1]. Результаты сведены в табл. 1.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ ЭАК

Математическая модель оптимизации (ММО) для роботизированных ЭАК, полученная по аналогии с исследованиями для условий действующих (нероботизированных) разрезов [9], имеет вид:

$$k = -0,275 + 0,205k_N + 0,386t_n^3 - 0,040t_p \rightarrow \max;$$

ДУБИНКИН Д.М.

Канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры
горных машин и комплексов
Кузбасского государственного
технического университета
им. Т.Ф. Горбачева (КузГТУ),
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

МАКСИМОВА О.С.

Младший научный сотрудник
научного центра
«Цифровые технологии»
Кузбасского государственного
технического университета
им. Т.Ф. Горбачева (КузГТУ),
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: maksimovaos@kuzstu.ru

Показатели работы действующих и роботизированных ЭАК разрезов АО УК «Кузбассразрезуголь»

Performance indicators of existing and autonomous STSs at open-pit coal mines of the Kuzbassrazrezugol JSC

Показатели									
Общие внутрисменные простои техники, $t_{пр}^1$, мин	Простои самосвалов, $t_{пр}^c$, мин	Простои экскаваторов, $t_{пр}^э$, мин	Расстояние транспортирования, $L_{тр}$, км	Время погрузки, $t_{гр}$, мин	Время грузевого пробега, $t_{пр}^g$, мин	Время разгрузки, $t_{разгр}$, мин	Время порожнего пробега, $t_{пор}^g$, мин	Продолжительность рейса, t_p , мин	Время рейса с учетом простоев техники, $(t_p + t_{пр}^T)$, мин; в скобках – продолжительность рабочей смены (суток), $T_{см}$, час
разрез «Кедровский»									
(8 экскаваторов; 31 самосвал; 1064/1277 рейсов; $k_{ЭАК} = 0,888/0,905$; $\lambda = 0,597/0,580$)									
Всего по разрезу, в том числе:									
4820 4607	2126 1913	2694	3714 4457	4004 4805	15531 16208	874 1050	11515 12018	32784 34081	37704 38688
– на один самосвал									
155,5 148,6	68,6 61,7	86,9	119,8 143,8	129,2 155,0	501,0 522,8	28,2 33,9	371,5 387,7	1057,6 1099,4	1213/1248
– на один рейс									
4,5 3,6	2,0 1,5	2,5 2,1	3,5	3,8	14,6 12,7	0,8	10,8 9,4	30,8 27,8	(20,2/20,8)
разрез «Моховский»									
(10 экскаваторов; 28 самосвалов; 1632/1958 рейсов; $k_{ЭАК} = 0,894/0,947$; $\lambda = 0,653/0,624$)									
Всего по разрезу, в том числе:									
4874 2636	1022 553	3853 2080	3361 4033	6041 7248	11639 13966	1530 1836	9395 11274	28960 34324	33835 36960
– на один самосвал									
174,1 94,1	36,5 19,8	137,6 74,3	120 144	215,8 258,8	415,7 498,8	54,7 65,6	335,5 402,6	1034,3 1225,8	1208/1320
– на один рейс									
3,0 1,4	0,6 0,33	2,4 1,1	2,1	3,7	7,1	0,9	5,8	17,7 17,5	(20,1/22,0)
разрез «Бачатский»									
(9 экскаваторов; 67 самосвалов; 1833/2200 рейсов; $k_{ЭАК} = 0,922/0,970$; $\lambda = 0,500/0,497$)									
Всего по разрезу, в том числе:									
7114 2995	5620 1501	1494	10611 12739	4528 5433	36689 44024	1690 2028	27965 33558	73142 85043	80256 88038
– на один самосвал									
106,2 44,7	83,9 28,4	22,3	158,4 190	67,6 81,1	547,6 657,1	25,2 30,3	417,4 500,9	1034,3 1225,8	1198/1314
– на один рейс									
3,9 1,4	3,1 0,7	0,8 0,7	5,8	2,5	20	0,9	15,3	39,9 38,6	(20,0/21,9)
разрез «Краснобродский»									
(12 экскаваторов; 93 самосвала; 3518/3975 рейсов; $k_{ЭАК} = 0,968/0,976$; $\lambda = 0,682/0,676$)									
Всего по разрезу, в том числе:									
4209 3517	1947 1255	2262	16182 18286	9567 10811	55997 63276	2880 3745	42573 48107	112348 125939	116557 129456
– на один самосвал									
45,3 37,8	20,9 13,5	24,3	174,0 195,8	102,9 116,2	602,1 680,4	31,0 40,3	457,8 517,3	1208 1354,2	1253/1392
– на один рейс									
1,2 0,9	0,5 0,3	0,6	4,6	2,7	15,9	0,9	12,1	31,9 31,7	(20,9/23,2)
разрез «Талдинский»									
(14 экскаваторов; 91 самосвал; 3372/4046 рейсов; $k_{ЭАК} = 0,946/0,962$; $\lambda = 0,704/0,718$)									
Всего по разрезу, в том числе:									
6376 5000	2818 1442	3558	13072 15686	9750 11700	45022 54026	2761 3313	34307 41168	95126 110206	101502 115206

Показатели									
Общие внутрисменные простои техники, $t_{пр}^1$, мин	Простои самосвалов, $t_{пр}^c$, мин	Простои экскаваторов, $t_{пр}^э$, мин	Расстояние транспортирования, $L_{тр}$, км	Время погрузки, $t_{пг}^3$, мин	Время грузевого пробега, $t_{пр}^4$, мин	Время разгрузки, $t_{разгр}^5$, мин	Время порожнего пробега, $t_{побр}^6$, мин	Продолжительность рейса, t_p , мин	Время рейса с учетом простоев техники, $(t_p + t_{пр})$, мин; в скобках – продолжительность рабочей смены (суток), $T_{сн}$, час
– на один самосвал									
<u>70,1</u> 54,9	<u>31,0</u> 15,8	39,1	<u>143,6</u> 172,4	<u>107,1</u> 128,6	<u>494,7</u> 593,7	<u>30,3</u> 36,4	<u>377</u> 432,4	<u>1045</u> 1211	1115/1266
– на один рейс									
<u>1,9</u> 1,2	<u>0,8</u> 0,4	0,9	3,9	2,9	13,4	0,8	10,2	<u>28,2</u> 27,2	(18,6/21,1)
разрез «Калтанский» (10 экскаваторов; 31 самосвал; 1241/1427 рейсов; $k_{ЭАК} = 0,964/0,967$; $\lambda = 0,410/0,417$)									
Всего по разрезу, в том числе:									
<u>1741</u> 1824	<u>457</u> 354	1471	<u>4722</u> 5430	<u>4448</u> 5115	<u>16282</u> 18724	<u>1091</u> 1254	<u>12500</u> 14375	<u>34908</u> 39468	<u>36649</u> 41292
– на один самосвал									
<u>58,8</u> 56,2	<u>14,8</u> 11,4	47,4	<u>152,3</u> 175,2	<u>143,5</u> 165,0	<u>525,2</u> 604,0	<u>35,2</u> 40,5	<u>403,2</u> 463,7	<u>1126,1</u> 1273,1	1182/1332
– на один рейс									
<u>1,4</u> 1,3	<u>0,4</u> 0,25	1,2	3,8	3,6	13,1	0,9	10,1	<u>28,1</u> 27,7	(19,7/22,2)
УК «Кузбассразрезголь» (63 экскаватора; 341 самосвал; 12660/14883 рейса; $k_{ЭАК} = 0,939/0,961$; $\lambda = 0,591/0,587$)									
Всего по разрезу, в том числе:									
<u>29135</u> 20579	<u>29322</u> 20579	<u>15331</u> 13568	<u>51661</u> 60625	<u>38337</u> 45112	<u>179131</u> 210224	<u>10826</u> 13226	<u>136752</u> 160500	<u>373741</u> 429061	<u>402876</u> 449964
– на один самосвал									
<u>85,4</u> 60,3	<u>41,0</u> 20,6	<u>45,0</u> 39,8	<u>151,5</u> 177,8	<u>112,4</u> 132,3	<u>525,3</u> 616,5	<u>31,7</u> 38,8	<u>401,0</u> 470,7	<u>1096</u> 1258,2	1181/1318
– на один рейс									
<u>2,3</u> 1,4	<u>1,1</u> 0,5	<u>1,2</u> 0,9	4,1	3,0	14,1	0,9	10,8	<u>29,5</u> 28,8	(19,7/22,0)

Примечание. Здесь и далее в числителе – показатели работы действующих ЭАК; в знаменателе – роботизированных ЭАК.

$$0,128k_N + 0,224t_n^3 - 0,0247t_p \geq 0,922;$$

$$0,128k_N + 0,224t_n^3 - 0,0247t_p \leq 1,073;$$

$$t_n^3 + 0,0613t_p \geq 4,756; \quad (1)$$

$$t_n^3 + 0,0613t_p \leq 5,126;$$

$$k_N \geq 5,0;$$

$$k_N \leq 6,510;$$

$$k_N \geq 0; t_n^3 \geq 0; t_p \geq 0.$$

Эта задача является стандартной задачей линейного программирования. Исследование ее дает следующую оптимальную симплекс-таблицу (табл. 2). В таблице k_N^* , t_n^3 , t_p^* – основные переменные, $y_1 - y_6$ – дополнительные переменные.

Оптимальное решение, таким образом, имеет следующий вид:

$$k_N^* = 5,0; t_n^3 = 4,0 \text{ мин}; t_p^* = 18,5 \text{ мин};$$

$$\lambda^* = 1,081; k^* = 1,393. \quad (2)$$

Оптимизируемый показатель k_N^* отражает соотношение количества самосвалов и обслуживающих их экскаваторов в составе ЭАК и, согласно ММО (1), может иметь два значения – 5,000 и 6,510.

ПРЕДЕЛЫ ИЗМЕНЕНИЯ ОПТИМИЗИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ

Значение k_N , может быть увеличено только с 5,0 до 6,510. Однако, если оптимальным считать значение k_N , равное не 5,0, а 6,510, то ему будет соответствовать значение $t_n^3 = 3,7$ мин, и $t_p = 23,5$ мин. Значение функционального критерия λ будет составлять уже не 1,081, как при оптимальном решении, а 1,018 (на 5,8% ниже). Значение комплексного показателя качества k при этом будет составлять не 1,393, а 1,382, то есть на 0,8% ниже, что с практической точки зрения несущественно.

Оптимальное решение (2) с $k_N^* = 5,0$ имеет то преимущество, что требует меньшего количества самосвалов для обслуживания имеющихся экскаваторов. Достичь этого можно за счет большей оборачиваемости само-

Таблица 2

Оптимальная симплекс-таблица для роботизированных ЭАК разрезов
Optimal simplex table for autonomous STS at open-pit coal mines

Величина	Свободный член	Свободные переменные		
		y_2	y_4	y_5
k	1,393	1,657	0,015	0,007
Базисные переменные:	5,0	0	0	-1
k_N				
t_n^3	4,0	1,595	0,643	0,204
t_p	18,5	-26,02	5,82	-3,33
y_1	0,156	1	0	0
y_3	0,370	0	1	0
y_6	1,510	0	0	1

свалов, однако за это придется «заплатить» весьма жестким с точки зрения возможности достижения значением продолжительности рейса: $t_p^* = 18,5$ мин. Такое значение t_p достигнуто только на одном разрезе «Моховский» ($t_p = 17,7$ мин), но расстояние транспортирования $L_{тр}$ на этом разрезе составляет всего 2,06 км. На всех остальных разрезах расстояние транспортирования гораздо больше (от 3,49 км на разрезе «Кедровский» до 5,79 км на разрезе «Бачатский»), а значит, и время рейса на всех этих разрезах будет значительно выше. Расстояние транспортирования горной массы $L_{тр}$ является показателем, который на разрезе труднее всего уменьшить, поскольку он напрямую связан с технологией ведения горных работ.

Поэтому есть смысл оптимальными считать следующие значения оптимизируемых параметров и целевого критерия:

$$k_N^* = 6,510; t_n^{3*} = 3,7 \text{ мин};$$

$$t_p^* = 23,5 \text{ мин}; \lambda^* = 1,018; k^* = 1,382. \quad (3)$$

Несмотря на то, что теперь для обслуживания имеющихся экскаваторов требуется в $6,51/5,0 = 1,3$ раза (на 30%) самосвалов, зато и оптимальной является большая продолжительность рейса самосвала $t_p^* = 23,5$ мин, что на 21,4% выше, чем в оптимальном случае, а значит, и большее оптимальное расстояние транспортирования ($L_{тр}^* = 3,1$ км вместо $L_{тр} = 2,1$ км в оптимальном варианте).

Значение показателя t_n^3 , как это следует из табл. 2, может быть только уменьшено (поскольку все коэффициенты в строке t_n^3 положительные). Суммарно это составляет

0,8 мин, то есть минимальное допустимое значение t_n^3 будет составлять $4,0 - 0,8 = 3,2$ мин. Максимальное $-t_n^3 = 4,0$ мин (см. табл. 2).

Значение показателя t_p , согласно табл. 2 (строка t_p), может быть и уменьшено, и увеличено. Уменьшено оно может на $5,82 \cdot 0,370 = 2,2$ мин, то есть с $18,5 - 2,2 = 16,3$ мин, а увеличено на $0,156 \cdot 26,02 + 1,51 \cdot 3,33 = 9,1$, то есть с $18,5$ до $27,6$ мин.

Таким образом, оптимизируемые параметры могут изменяться в следующих пределах:

$$k_N = 5,0-6,510;$$

$$t_n^3 = 3,2-4,0 \text{ мин}; \quad (4)$$

$$t_p = 16,3-27,6 \text{ мин}.$$

В этих пределах оптимизируемые параметры k_N, t_n^3 и t_p можно изменять без изменения ММО. Все эти изменения будут взаимосвязаны, однако пересчеты не представляют особых затруднений, что очень удобно при проведении исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из приведенных пределов изменения значений параметров видно, что варьировать имеет смысл продолжительность рейса самосвала t_p как наиболее значимую в реальных условиях эксплуатации. Причем интересными являются значения t_p , которые больше оптимального значения, то есть $t_p = 23,5-27,6$ мин, поскольку эти значения являются более подходящими для реальных условий разрезов УК «Кузбассразрезуголь». Для получения таких полных данных по соотношениям оптимизируемых параметров, функционального критерия и комплексного показателя качества работы ЭАК для задаваемых значений продолжительности рейса проведены соответствующие расчеты. Результаты представлены в табл. 3.

В идеале значение функционального критерия должно быть равно или близко к $\lambda = 1,0$. Однако в работе [10] указывается, что в горной промышленности являются целесообразными значения функционального критерия λ меньше 1, что соответствует меньшим по численности паркам карьерных самосвалов. При этом, хотя и увеличиваются простои экскаваторов, зато существенно снижаются эксплуатационные расходы, большая часть которых на открытых горных работах приходится именно на автотранспорт.

Приемлемыми являются все значения $\lambda \geq 0,9$ (для роботизированных ЭАК это: $t_p^{\max} = 25,5$ мин; $t_n^{3\min} = 3,55$ мин; $\lambda^* = 0,909$; $k^* = 1,261$; см. табл. 3). Значение комплексного показателя качества работы ЭАК $k = 1,261$ в этом случае

Таблица 3

Результаты расчета соотношений оптимизируемых параметров, функционального критерия и комплексного показателя качества работы роботизированных ЭАК ($k_N^* = 6,510$)

Results of calculating the ratios of optimized parameters, functional criteria and a comprehensive indicator of the autonomous STS operation quality ($k_N^* = 6,510$)

t_p , мин	23,5	24,0	24,5	25,0	25,5	26,0	26,5	27,0	27,2	27,6
t_n^3 , мин	3,7	3,65	3,6	3,6	3,55	3,5	3,5	3,5	3,5	3,4
λ	1,018	0,990	0,961	0,935	0,909	0,884	0,859	0,836	0,827	0,809
k	1,382	1,353	1,318	1,292	1,261	1,231	1,200	1,169	1,157	1,130

превышает наилучшее значение для характерного для УК «Кузбассразрезуголь» разреза «Талдинский» $k = 1,092$ на 14,4% и на 38,7% выше, чем в целом по Компании ($k = 0,879$) в роботизированном варианте [1].

Помимо оптимального (столбец 1, см. табл. 3) и квази-оптимального (столбец 5, см. табл. 3) вариантов целесообразно рассмотреть также вариант с максимально возможным значением продолжительности рейса $t_p^{\max} = 27,6$ мин (худший вариант), а также вариант для разреза «Талдинский» – $t_p^{\max} = 27,2$ мин (см. табл. 3).

Для худшего варианта, несмотря на то, что значение функционального критерия в этом случае составляет лишь $\lambda = 0,809$, это все равно на 12,7% выше, чем достигнуто у лучшего по этому критерию роботизированного разреза «Талдинский» ($\lambda = 0,718$), а значение комплексного показателя $k = 1,130$ на 3,4% выше, чем на этом разрезе ($k = 1,092$), и на 25,0% выше, чем в целом по Компании в роботизированном варианте ($k = 0,879$).

Для роботизированного разреза «Талдинский» значение функционального критерия λ составляет 0,827, что на 14,1% выше, а значение комплексного показателя качества $k = 1,157$ на 5,8% выше, чем у роботизированного разреза и на 27,3% выше, чем в целом по Компании. И хотя значение функционального критерия $\lambda = 0,827$, строго говоря, меньше граничного значения в $\lambda \geq 0,9$, однако оно достаточно близко к нему, а значение комплексного показателя $k = 1,157$ все равно на 5,8% выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, оптимизация показателей роботизированных ЭАК УК «Кузбассразрезуголь» дает повышение качества их работы на 27,3%, сама роботизация – на 42%, составляя вместе примерно 70%, то есть более чем на 2/3 по сравнению с качеством работы действующих ЭАК.

Список литературы • References

1. Сравнительная оценка качества действующих и роботизированных экскаваторноавтомобильных комплексов разрезов / Ю.Е. Воронов, А.Ю. Воронов, Д.М. Дубинкин и др. // Уголь. 2023. № 11. С. 65-71. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-65-71.
Voronov Yu.E., Voronov A.Yu., Dubinkin D.M., Maksimova O.S. Dispatching in truck-shovel systems with unmanned transport at open-pit mines. *Ugol'*. 2023;(11):65-71. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-11-65-71.
2. Brown C. Autonomous vehicle technology in mining. *Engineering & Mining Journal*. 2012;213(1):30-32.
3. Report 2. Autonomous mining equipment. New Technology & Innovation. RFC Ambrian, May 2019. 36 p.
4. Цифровая экономика Западной Австралии – умные горнорудные и нефтегазовые предприятия, железные дороги, морские порты и формализованные онтологии / И.А. Соколов, А.С. Мишарин, В.П. Куприяновский и др. // International Journal of Open Information Technologies. 2018. Vol. 6. № 6. С. 44-62.
Sokolov I.A., Misharin A.S., Kupriyanovsky V.P., Pokusaev O.N., Larin O.N. The digital economy of Western Australia – smart mining, oil, gas enterprises, railways, seaports, and formalized ontologies. *International Journal of Open Information Technologies*. 2018;6(6):44-62. (In Russ).

5. Golbasi O. Equipment replacement analysis of manual trucks with autonomous truck technology in open pit mines / O. Golbasi, K. Dagdelen. APCOM 38. Golden, COL: Colorado School of Mines, 2017, pp. 19-9–19-20.
6. Parreira J. An interactive simulation model to compare an autonomous haulage truck system with a manually-operated system. PhD thesis, Vancouver, The University of British Columbia, 2013, 228 p.
7. Мониторинг динамического состояния автономных тяжелых платформ на карьерных маршрутах горнорудных предприятий / С.Г. Костюк, И.В. Чичерин, Б.А. Федосенков и др. // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. Т. 12. № 4. С. 600-608. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-600-608.
Kostyuk S.G., Chicherin I.V., Fedosenkov B.A., Dubinkin D.M. Monitoring of the dynamic state of autonomous heavy platforms on quarry routes of mining enterprises. *Ustojchivoe razvitie gorvykh territorij*. 2020;12(4):600-608. (In Russ.). DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-4-600-608.
8. Хазин М.Л. Роботизированная техника для добычи полезных ископаемых // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2020. Т. 18. № 1. С. 4-15.
Khazin M.L. Robotic equipment for mining operations. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo technicheskogo universiteta imeni G.I. Nosova*. 2020;18(1):4-15. (In Russ).
9. Оптимизация параметров экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов / Ан.Ю. Воронов, А.А. Хорешок, Ю.Е. Воронов и др. // Горная промышленность. 2022. № 5. С. 92-98.
Voronov An.Yu., Khoreshok A.A., Voronov Yu.E., Dubinkin D.M., Voronov Ar.Yu. Optimization of parameters of shovel-truck systems at open-pit coal mines. *Gornaya promyshlennost*. 2022;(5):92-98. (In Russ).
10. Burt C.N., Caccetta L. Match factor for heterogeneous truck and loader fleets. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. 2007;21(4):262–270.

Authors Information

Voronov Yu.E. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Chief Researcher of the Scientific Center “Digital Technologies”, Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: vyue.ap@kuzstu.ru

Voronov A.Yu. – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Drive and Automation, Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: voronovayu@kuzstu.ru

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

Maksimova O.S. – Junior Researcher of the Scientific Center “Digital Technologies”, Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: maksimovaos@kuzstu.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 11.06.2024

Поступила после рецензирования: 16.06.2024

Принята к публикации: 25.06.2024

Paper info

Received June 11, 2024

Reviewed June 16, 2024

Accepted June 25, 2024