

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

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

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

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU),
Kemerovo, 650000, Russian Federation
✉ e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Определение показателей роботизированных экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов по результатам оптимизации*

Determining the performance indicators of autonomous truck-shovel systems at open-pit coal mines based on optimization results

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2024-115-108-115>

ВОРОНОВ Ю.Е.

Доктор техн. наук, профессор,
главный научный сотрудник
научного центра
«Цифровые технологии»
ФГБОУ ВО «КузГТУ»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: vyue.ap@kuzstu.ru

ВОРОНОВ А.Ю.

Канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры ЭА ФГБОУ ВО «КузГТУ»,
650000, г. Кемерово, Россия,
e-mail: voronovayu@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



Оптимизация работы роботизированных экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК) разрезов УК «Кузбассразрезуголь» осуществляется по трем комплексным оптимизируемым параметрам – количество самосвалов на один экскаватор, время загрузки самосвала экскаватором и время рейса самосвала по критерию качества работы ЭАК. Из этих значений можно благодаря существующим взаимосвязям получить конкретные оптимальные значения остальных показателей работы ЭАК. Получены не только фиксированные значения показателей, но и диапазоны их варьирования в пределах заданной парадигмы оптимизации, что существенно облегчает комплектование экскаваторного и автотранспортного парков ЭАК из существующих марок и моделей карьерных экскаваторов и самосвалов. Рассмотрен порядок синтеза основных оптимальных показателей работы ЭАК, характерного для разреза «Талдинский» УК «Кузбассразрезуголь». Показано, как можно изменять численность парков техники разреза при изменении требуемых объемов погрузки и перевозок горной массы. Установлены опти-

* 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.

мальные значения численности парков экскаваторов и самосвалов грузоподъемностью 220 т применительно к разрезу «Талдинский».

Ключевые слова: карьер; экскаваторно-автомобильный комплекс; роботизированные перевозки; синтез оптимальных показателей работы.

Для цитирования: Определение показателей роботизированных экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов по результатам оптимизации / Ю.Е. Воронов, А.Ю. Воронов., Д.М. Дубинкин и др. // Уголь. 2024;(115): 108-115. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-115-108-115.

Abstract

Optimization of autonomous shovel-truck systems (STS) operation at the open-pit coal mines of the Kuzbassrazrezugol JSC is performed using three complex optimized parameters: the number of trucks per shovel, truck loading time, and the truck haul time according to the STS operation quality criterion. Based on these values, specific optimal values of other STS operation indicators can be obtained using the existing relationships. Not only fixed indicator values were obtained, but also the ranges of their variation within the given optimization paradigm, which significantly simplifies the assembly of the STS shovel and truck fleets from the existing brands and models of mining shovels and trucks. The procedure for synthesizing the main optimal STS operation indicators typical for the Taldinsky Mine of the Kuzbassrazrezugol JSC is considered. It is shown how the number of equipment fleets of the mine can be changed when the required volumes of material loading and transportation change. Optimal values for the number of shovel and truck fleets are established in relation to the Taldinsky Mine.

Keywords

Open-pit mine; shovel-truck system; autonomous hauling; synthesis of optimal performance indicators/

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 T.F. 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 mining dump truck with a payload of 220 tons» in terms of research, development and experimental-design work.

For citation

Voronov Yu.E., Voronov A.Yu., Dubinkin D.M., Maksimova O.S. Determining the performance indicators of autonomous shovel-truck systems at open-pit coal mines based on optimization results. *Ugol'*. 2024;(115):108-115. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2024-115-108-115.

ПОСТАНОВКА ВОПРОСА

В работе [1] установлены оптимальные значения оптимизируемых параметров k_N^* , k_{Π}^* и t_p^* , функционального критерия λ^* и комплексного показателя качества работы ЭАК k^* . Из этих значений можно синтезировать основные показатели работы ЭАК разрезов.

МЕТОДИКА СИНТЕЗА

1. Вначале определяется оптимальное значение коэффициента эксплуатационной производительности ЭАК $k_{\text{ЭАК}}^*$. Показатель k_N равен:

$$k_N = \frac{N_c}{N_3 \cdot k_{\text{ЭАК}}}, \quad (1)$$

откуда $k_{\text{ЭАК}} = k_N' / k_N$, а $k_N' = N_c / N_3$ – количество самосвалов для обслуживания имеющегося парка экскаваторов в ЭАК.

МАКСИМОВА О.С.

Младший научный сотрудник научного центра «Цифровые технологии» ФГБОУ ВО «КузГТУ», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: maksimovaos@kuzstu.ru

С другой стороны, $k'_N = k_N - k_N^{cp}$, где k_N^{cp} – средневзвешенное по разрезам значение k_N . Для действующих ЭАК разрезов УК «Кузбассразрезуголь» $k_N^{cp} = 0,357$; для роботизированных $k_N^{cp} = 0,221$. Тогда:

$$k_{ЭАК}^* = \frac{k_N^* - 0,221}{k_N^*}.$$

Из этих же величин определяется оптимальное значение соотношения k'_N :

$$k'_N = (N_c / N_p)^* = k_N^* \cdot k_{ЭАК}^*.$$

2. По полученным данным можно определить оптимальную продолжительность рабочей смены (сутки) $T_{см}^*$.

Для этого исходная зависимость для определения $k_{ЭАК}^*$:

$$k_{ЭАК}^* = 1 - \frac{t_{пр\Sigma}^T}{T_{см} (N_c / N_p)^*}, \quad (2)$$

где $t_{пр\Sigma}^T$ – суммарные простои экскаваторов и самосвалов ЭАК в течение смены, мин; зависимость сравнивается с (1) и решается относительно $T_{см}^*$.

Суммарные простои экскаваторов и самосвалов равны суммарной продолжительности смены для всех самосвалов за минусом времени работы всех самосвалов в течение смены (t_p – время рейса самосвала, мин; n_p – количество рейсов всех самосвалов):

$$t_{пр\Sigma}^T = T_{см} \cdot T_c - t_p \cdot n_p. \quad (3)$$

Подстановка значения $t_{пр\Sigma}^T$ в зависимость (2) с учетом зависимости (1) даст:

$$T_{см}^* = \frac{t_p^* \cdot (n_p / N_c)^*}{1 + \frac{1 - 0,221}{k_N^*} - \frac{1}{k_N^* - 0,221}}, \quad (4)$$

где n_p / N_c – количество рейсов, совершенных каждым самосвалом в течение рабочей смены (суток).

Как показывают предварительные расчеты, значения n_p / N_c имеют линейную зависимость от продолжительности рейса самосвала t_p . Эта и другие взаимозависимости между показателями работы ЭАК приведены в табл. 1.

Замена в формуле (4) выражения n_p / N_c на его линейную модель (см. табл. 1) дает окончательную зависимость для $T_{см}^*$:

$$T_{см}^* = \frac{1,7t_p^* \cdot (55,5 - t_p^*)}{1 + \frac{0,779}{k_N^*} - \frac{1}{k_N^* - 0,221}}. \quad (5)$$

Оптимальные значения продолжительности смены и других показателей, зависящих от продолжительности рейса самосвалов, будем определять для четырех значений t_p^* из работы [1, табл. 3]: I вариант – оптимальный, $t_p^* = 23,5$ мин (ему соответствует максимальное значение функционального критерия $\lambda^* = 1,018$); II вариант – промежуточный, допустимое по функциональному критерию ($\lambda \geq 0,9$) значение $t_p^* = 25,5$ мин (ему соответствует значение функционального критерия $\lambda^* = 0,909$); III вариант – худший, максимально возможное значение $t_p^{\max} = 27,6$ мин (ему соответствует значение функционального критерия $\lambda = 0,809$); IV вариант – для УК «Кузбассразрезуголь», разрез «Талдинский», характерно значение $t_p^* = 27,2$ мин

(ему соответствует значение функционального критерия $\lambda^* = 0,827$).

3. Исходя из взаимосвязи показателя производительности экскаваторного парка ЭАК П³ и величины k_N^* (см. табл. 1):

$$П^3 = 10,85 + 5,884k_N^* \pm 3,54,$$

определяется оптимальное значение показателя k_N^* .

4. Из аналогичной связи (см. табл. 1):

$$(n_k - 3)^* = 6,395 - 0,635k_N^* \pm 0,381$$

получается оптимальное значение показателя количества ковшей, загружаемых в кузов самосвала $(n_k - 3)^*$, откуда устанавливается оптимальное количество загружаемых ковшей n_k^* .

5. Оптимальное значение расстояния транспортирования $L_{тр}^*$ определится из зависимости (см. табл. 1):

$$L_{тр}^* = 0,176t_p - 1,06 \pm 0,083.$$

Как и для других показателей, зависящих от продолжительности рейса t_p^* , просчитывается четыре варианта.

6. Оптимальное значение доли простоев в продолжительности рабочей смены также определяется из зависимости (см. табл. 1):

$$k_{тр}^{\Sigma} = 1,347 + 1,352k_{ЭАК}^* \pm 0,002.$$

7. Оптимальное значение числа рейсов каждого самосвала в смену (сутки) определяется по формуле (см. табл. 1):

$$n_p / N_c = 94,3 - 1,7t_p \pm 2,041.$$

8. Оптимальное значение среднесуточного пробега каждого самосвала определяется по формуле $L_{ср.сут}^* = 2L_{тр}^* (n_p / N_c)^*$, а эксплуатационной скорости – по формуле $9_3^* = L_{ср.сут}^* / T_{см}^*$.

9. Оптимальные значения средневзвешенных величин вместимости ковша $E_k^{\Sigma*}$ и времени цикла экскаватора $t_{ц}^{\Sigma*}$ определяются следующим образом (см. табл. 1):

$$\widetilde{t}_{ц}^{\Sigma*} = 0,00195\widetilde{E}_k^{\Sigma*} + 0,435 \pm 0,005.$$

$$\text{С другой стороны } - \left(\widetilde{E}_k^{\Sigma*} / \widetilde{t}_{ц}^{\Sigma*} \right)^* = П^{\Sigma*}.$$

Решение совместно этих двух уравнений дает оптимальные значения $\widetilde{E}_k^{\Sigma*}$ и $\widetilde{t}_{ц}^{\Sigma*}$.

Они составляют: $\widetilde{E}_k^{\Sigma*} = 23,3 \pm 1,6 \text{ м}^3$ и $\widetilde{t}_{ц}^{\Sigma*} = 29,2 \pm 4,1 \text{ с}$. Таким значениям соответствует, например, экскаватор Hitachi EX3600-6 ($E_k^{\Sigma} = 22 \text{ м}^3$; $t_{ц}^{\Sigma} = 28 \text{ с}$), работающий на разрезе «Талдинский». Такому сочетанию соответствует значение производительности экскаваторного парка, состоящего из экскаваторов Hitachi EX3600-6: $П^3 = 47,14 \text{ м}^3/\text{мин}$, что, как показывают расчеты, попадает в оптимальный диапазон для этого показателя (см. табл. 1).

10. Оптимальная величина средневзвешенной вместимости кузова самосвала равна:

$$\widetilde{E}_k^{\Sigma*} = \widetilde{E}_k^{\Sigma*} \cdot n_k^*.$$

Полученному значению $\widetilde{E}_k^{\Sigma*} = (126,5 \pm 17,9 \text{ м}^3)$ в наибольшей степени соответствует самый распространенный на разрезах УК «Кузбассразрезуголь» самосвал БелАЗ-75306 ($E_k^{\Sigma} = 129,8 \text{ м}^3$).

Результаты корреляционного анализа взаимосвязей показателей работы роботизированных ЭАК разрезов УК «Кузбассразрезуголь»

Results of correlation analysis of the interrelations of the performance indicators of autonomous STSs at open-pit mines of the Kuzbassrazrezugol JSC

Исследуемые взаимосвязи	Параметры регрессии		Значимость параметров регрессии, F	Критическое значение критерия Фишера, $F_{кр}$	Коэффициент корреляции, r	Надежность коэффициента корреляции, t	Критическое значение критерия Стьюдента, $t_{кр}$	Стандартное отклонение, S_0
	a	b						
Количество рейсов на один самосвал – время рейса: $n_p / N_c = a + bt_p$	94,3	-1,7	535,7	6,94	0,934	5,23	2,776	2,041
Время загрузки кузова – время рейса: $n_n = a + bt_p$	4,94	-0,0613	151,95	6,94	0,747	2,25	2,776	0,185
Расстояние транспортирования – время рейса: $L_{тр} = a + bt_p$	-1,06	0,176	1307,3	6,94	0,990	99,0	2,776	0,083
Доля простоев в продолжительности смены – коэффициент эксплуатационной производительности: $k_{тр}^{\Sigma} = a + bk_{ЭАК}$	1,347	1,352	667,6	6,94	0,999	544	2,776	0,002
Время цикла экскаватора – вместимость ковша экскаватора: $t_{ц}^{\circ} = a + bE_k^{\circ}$	0,435	0,00195	5224,1	6,94	0,805	5,08	2,776	0,005
Показатель производительности экскаваторного парка – соотношение самосвалов и экскаваторов: $\Pi^{\Sigma} = a + b(N_c / N_3)$	10,85	5,884	75,25	6,94	0,862	3,40	2,776	3,54
Число загружаемых ковшей – соотношение численности самосвалов и экскаваторов: $n'_k = a + b(N_c / N_3)$	6,395	-0,635	38,1	6,94	0,862	3,40	2,776	0,381

11. Оптимальное значение показателя производительности автотранспортного парка ЭАК разреза Π^{c*} определится как ($\text{м}^3/\text{мин}$):

$$\Pi^{c*} = \widetilde{E}_k^{c*} / t_p^*$$

и по аналогии с другими величинами, зависящими от времени цикла самосвала t_p , имеет четыре значения.

12. Допустимый уровень простоев техники определяется исходя из следующих соображений. Оптимальная доля простоев техники в продолжительности рабочей смены (суток) $t_{пр}^{\Sigma*}$ может быть получена из выражения (см. табл. 1):

$$t_{пр}^{\Sigma*} = 1,347 + 1,352k_{ЭАК}^* \pm 0,002.$$

Входящий в это уравнение коэффициент эксплуатационной производительности $k_{ЭАК}$ представлен формулой (2).

13. Представление зависимости (2) в виде:

$$k_{ЭАК} = 1 - \frac{\overline{t}_{пр}^T}{T_{см} \left(1 + \frac{1}{k'_N}\right)}$$

где $\overline{t}_{пр}^T = t_{пр\Sigma}^T / N_c$ – суммарные простои техники ЭАК в расчете на один самосвал, мин; дает зависимость:

$$\overline{t}_{пр}^T = (1 - k_{ЭАК}^*) \left(1 + \frac{1}{k'_N}\right) T_{см}^* \quad (6)$$

С учетом того, что $\overline{t}_{пр}^T = T_{см}^* / k_{пр}^{\Sigma}$, подстановка зависимости в (6) и проведение преобразований дают:

$$\overline{t}_{пр}^{\Sigma*} = k_{пр}^{\Sigma*} \cdot T_{см}^*$$

Имея значения $\overline{t}_{пр}^{\Sigma*}$, можно определить соответствующие показатели в расчете на один рейс:

$$t_{пр}^{\Sigma*} = \overline{t}_{пр}^{\Sigma*} / (n_p / N_c)^* \quad (7)$$

Так как в формуле (7) в состав $t_{пр}^{\Sigma*}$ не входят простои самосвалов в ожидании погрузки, соблюдается равенство:

$$t_{пр}^{T*} = t_{пр}^{\Sigma*} \quad (8)$$

Полученные независимые величины могут послужить основой для возможной корректировки продолжительности рабочей смены, оптимальное значение которой получено по формуле (5).

$$T_{см}^* = (t_p^* + t_{пр}^{T*}) \cdot (n_p / N_c)^* \quad (9)$$

Сравнение показывает, что оптимальные значения $T_{см}^*$ рассчитанные по формулам (5) и (9), совпадают.

14. Оптимальная величина производительности ЭАК равна:

$$\Pi_{ЭАК}^* = \frac{\Pi^{\Sigma*} \cdot T_{см}^*}{k_N^*} \quad (10)$$

15. Независимым исходным показателем, характеризующим ЭАК, является количество экскаваторов в составе парка, N_3 . Они определяют требуемые объемы погрузки и перевозок горной массы за смену (сутки).

На разрезах УК «Кузбассразрезголь» в рассматриваемый период по вскрыше работали от 8 (разрез «Кедровский») до 14 (разрез «Талдинский») экскаваторов различных моделей и марок. Поэтому и дальнейшие расчеты проводятся для $N_3 = 8-14$ единиц.

$$N_c^* = N_3 \cdot k_N^* \cdot k_{ЭАК}^* = 6,3N_3.$$

Результаты расчетов приведены в *табл. 2*.

Здесь имеется в виду, что используется N_3 экскаваторов со средневзвешенными параметрами ($E_k^{3*} = 23,3 \pm 1,6 \text{ м}^3$; $t_{п}^{3*} = 29,2 \pm 4,1 \text{ с}$) и N_c^* самосвалов также со средневзвешенной вместимостью кузова ($E_k^{c*} = 126,5 \pm 17,9 \text{ м}^3$). Если парки смешанные, экскаваторы и самосвалы нужно подбирать таким образом, чтобы средневзвешенные показатели были в пределах приведенных выше значений.

16. Имея данные по оптимальному и фактическому количеству самосвалов в ЭАК разреза «Талдинский», дополнительно можно определить следующие показатели:

– оптимальное количество выполненных за смену рейсов:

$$n_p^* = (n_p / N_c) \cdot N_c^*; \quad (11)$$

– оптимальные объемы погрузки и перевозок:

$$G^* = m_{гр}^* \cdot n_p^*, \quad (12)$$

где $m_{гр}^*$ – оптимальная грузоподъемность средневзвешенного самосвала, м^3 .

Величину $m_{гр}^*$ можно установить через пропорции вместимостей кузовов. Для этого вначале определяется соотношение грузоподъемности самосвала и вместимости его кузова $m_{гр} / E_k^c$ для всех самосвалов, работавших в рассматриваемый период по вскрыше на характерном для УК «Кузбассразрезголь» разрезе «Талдинский». Это самосвалы БелАЗ-75131 (130 т; $71,2 \text{ м}^3$), БелАЗ-75306 (220 т; $129,8 \text{ м}^3$), БелАЗ-75600 (320 т; 199 м^3) и БелАЗ-75603 (360 т; 218 м^3). Средняя величина $m_{гр} / E_k^c$ для них составляет 1,695, и полностью совпадает с указанным коэффициентом для БелАЗ-75306 грузоподъемностью 220 т. Тогда:

$$m_{гр}^* = \left(\frac{m_{гр}^{Б75306}}{E_k^{Б75306}} \right) \cdot E_k^{c*},$$

где $m_{гр}^{Б75306}$, $E_k^{Б75306}$ – номинальные грузоподъемность и вместимость кузова самосвала-аналога БелАЗ-75306.

17. Для определения оптимальных значений показателей производительного использования экскаваторного и автотранспортного парков:

$$k_p^3 = \frac{t_{п}^3}{t_{п}^c}; \quad k_p^c = \frac{t_p}{t_{п}^c}, \quad (13)$$

необходимо разделить общие простои техники $t_{п}^{T*}$ из (8) на простои экскаваторов $t_{п}^{3*}$ и самосвалов $t_{п}^{c*}$.

Установить оптимальное значение указанных показателей можно исходя из следующих соображений. Предприятия стремятся максимально сократить простои экскаваторов как наиболее высокопроизводительных и дорогостоящих машин в составе ЭАК. С другой стороны, основополагающим является тот принцип, что уровень каждого показателя качества работы ЭАК должен быть уже достигнут в реальности, хотя бы и на разных предприятиях. Мини-

Таблица 2

Оптимальное количество самосвалов N_c^* для обслуживания N_3 экскаваторов

Optimal number of trucks N_c^* to service N_3 shovels

N_3	8	9	10	11	12	13	14
N_c^*	50	56	63	69	75	81	88

мальное соотношение простоев экскаваторов и самосвалов достигнуто на разрезе «Бачатский» ($t_{п}^3 / t_{п}^c = 1,0$), максимальное – на разрезе «Калтанский» ($t_{п}^3 / t_{п}^c = 4,155$), то есть достаточно сильно различаются. Минимальное соотношение составляет $t_{п}^3 / t_{п}^c = 1,0$. Это значение и следует считать оптимальным в современных условиях в УК «Кузбассразрезголь». Оптимальное значение суммарных простоев экскаваторов и самосвалов (техники) $t_{п}^{T*}$ (8) необходимо разделить в зависимости от данного соотношения. Имеем:

$$t_{п}^{c*} = \frac{t_{п}^{T*}}{1 + (t_{п}^3 / t_{п}^c)}; \quad t_{п}^{3*} = t_{п}^{T*} - t_{п}^{c*}. \quad (14)$$

Результаты расчета оптимальных показателей работы роботизированных ЭАК с оптимальными параметрами для заданных четырех вариантов приведены в *табл. 3*.

Сравнение показателей работы ЭАК разреза «Талдинский»

Поскольку сравнение показателей работы действующего и роботизированного (неоптимизированного) ЭАК (в том числе и разреза «Талдинский») уже произведено в некоторых предыдущих работах, в частности в работах [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14], здесь производится сравнение только роботизированных оптимального и неоптимального ЭАК.

Сравнительные показатели работы ЭАК разреза «Талдинский» приведены в *табл. 4*.

РЕЗУЛЬТАТЫ, ИХ АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из анализа данных (см. *табл. 3, 4*) установлено следующее.

Для оптимальных ЭАК продолжительность рабочей смены (суток) однозначно выше. Она увеличивается с 21,1 до 22,7 ч (на 10,8%). Поскольку продолжительность смены во многом определяется сменным заданием на объемы погрузки и вывоза горной массы, возможность работать меньше времени прямо связана с заниженным сменным заданием. То, что оптимальная продолжительность рабочей смены (суток) выше фактического значения для разреза «Талдинский» (см. *табл. 4*), свидетельствует о возможности оптимального ЭАК либо осуществлять погрузку и перевозку больших объемов горной массы по сравнению с неоптимизированным роботизированным ЭАК, либо соответственно сократить численный состав парков техники (и экскаваторов, и самосвалов). В связи с тем, что самосвалы в течение рабочей смены могут работать больше, на 4,6% увеличивается количество выполненных рейсов всего, и на 8,1% – в расчете на один самосвал.

Из-за некоторого увеличения оптимальной вместимости кузова самосвала (~ на 10 м^3) и уменьшения вместимости ковша экскаватора (~ на 1 м^3) увеличивается оптималь-

**Оптимальные значения показателей работы
роботизированных ЭАК разрезов УК «Кузбассразрезголь»**

Optimal performance indicators of autonomous STSs at open-pit mines of the Kuzbassrazrezugol JSC

Показатели	Оптимальные значения по вариантам ЭАК			
	I	II	III	IV
Количество самосвалов, обслуживающих каждый экскаватор, $k_N^* = N_c / N_s$	6,3			
Продолжительность рабочей смены (суток), $T_{см}$, ч	22,2	22,55	22,7	22,7
Возможные объемы погрузки и перевозок за смену, G , тыс. т	10233 ± 37	960 ± 37	893 ± 37	905 ± 37
Количество выполненных рейсов, n_p	4782 ± 179	4488 ± 180	4171 ± 179	4232 ± 179
Нагрузка на рейс, $m_{гр}$, т	214 ± 30			
Время рейса самосвала, t_p , мин	23,5	25,5	27,6	27,2
Количество рейсов каждого самосвала за смену, (n_p / N_c)	54,3 ± 2,0	51,0 ± 2,0	47,4 ± 2,0	48,1 ± 2,0
Средневзвешенная вместимость ковша экскаватора, \widetilde{E}_k^3 , м ³	23,3 ± 1,6			
Средневзвешенное время цикла экскаватора, $\widetilde{t}_{ц}^3$, с	29,2 ± 4,1			
Показатель производительности экскаваторного парка, $\widetilde{\Pi}^3$, м ³ /мин	47,85 ± 3,54			
Средневзвешенная вместимость кузова самосвала, \widetilde{E}_k^c , м ³	126,5 ± 17,9			
Показатель производительности автотранспортного парка, $\widetilde{\Pi}^c$, м ³ /мин	5,4 ± 0,8	5,0 ± 0,7	4,6 ± 0,6	4,65 ± 0,65
Количество загружаемых в кузов ковшей, n_k	5,4 ± 0,4			
Производительность ЭАК в расчете на один самосвал, $\Pi_{ЭАК}^{уд}$ тыс. м ³ /смену	9,77 ± 0,72	9,94 ± 0,74	10,01 ± 0,74	10,01 ± 0,74
Расстояние транспортирования, $L_{тр}$, км	3,08 ± 0,08	3,43 ± 0,08	3,80 ± 0,08	3,73 ± 0,08
Среднесуточный пробег самосвалов, $L_{ср.сут}$, км	335,1 ± 21,3	350,3 ± 22,0	360,6 ± 23,1	358,8 ± 22,9
Эксплуатационная скорость самосвалов, ϑ , км/ч	15,1 ± 1,0	15,5 ± 1,0	15,9 ± 1,0	15,8 ± 1,0
Общий уровень простоев техники (экскаваторов и самосвалов) на рейс, $t_{пр}^T$, мин	1,0 ± 0,01	1,09 ± 0,01	1,18 ± 0,01	1,16 ± 0,01
Доля суммарных простоев техники в продолжительности смены, $k_{пр}^2$	0,041 ± 0,002			
Уровень простоев экскаваторного парка за рейс, $t_{пр}^3$, мин	0,5	0,543	0,589	0,580
Уровень простоев парка самосвалов за рейс, $t_{пр}^c$, мин	0,5	0,544	0,588	0,580
Соотношение времени простоев экскаваторов и самосвалов, $k_{пр}^{3-c} = t_{пр}^3 / t_{пр}^c$	1,0			
Соотношение времени работы и простоев экскаваторного парка, $k_{пр}^3 = t_p^3 / t_{пр}^3$	7,40	6,45	5,77	6,03
Соотношение времени работы и простоев автотранспортного парка, $k_{пр}^c = t_p^c / t_{пр}^c$	46,9			
Коэффициент эксплуатационной производительности, $k_{ЭАК}$	0,966			
Функциональный критерий, λ	1,018	0,909	0,809	0,827
Комплексный показатель качества работы ЭАК, k	1,382	1,259	1,130	1,157

ная грузоподъемность самосвала с 200 до 214 т. Из этого следует, что количество рейсов, выполненных фактически на разрезе «Талдинский» для перевозки одних и тех же объемов горной массы, соответствует меньшему в $m_{гр}^* / m_{гр}^{факт} = 214/200 = 1,070$ раза количеству рейсов. То есть $n_{п}^{факт} = 4046$ рейсов самосвалов средневзвешенной грузоподъемностью 200 т соответствует $n_p^* = 3781$ рейсу самосвалов оптимальной грузоподъемности (214 т).

Кроме этого, из-за уменьшения оптимальной вместимости ковша экскаватора на 4,9% уменьшается показатель производительности экскаваторного парка. Соответственно, из-за увеличения оптимальной вместимости ку-

зова самосвалов на 8,6% увеличивается показатель производительности автотранспортного парка.

На 3,9% снижается оптимальное расстояние транспортирования и, соответственно, эксплуатационная скорость самосвалов, в результате чего практически не изменилась производительность ЭАК в расчете на один самосвал.

Общий уровень простоев техники снизился на 6,1%, вследствие чего доля суммарных простоев техники в продолжительности рабочей смены уменьшилась на 4,7%.

Существенно увеличивается соотношение времени работы и простоев техники: экскаваторов – в 2,2 раза, само-

Показатели роботизированных обычного и оптимального ЭАК разреза «Талдинский»

Indicators of autonomous conventional and optimized STSs at the Taldinsky Mine

Показатели	Роботи- зированный ЭАК	Оптимальные значения под:	
		оптимальные объемы перевозок, G^*	фактические объемы перевозок, $G^{\text{факт}}$
Количество экскаваторов в ЭАК, N_3	14	14	13
Количество самосвалов в ЭАК, N_c	91	88	79
Количество самосвалов, обслуживающих каждый экскаватор, $k'_N = N_c / N_3$	6,5	6,3	
Продолжительность рабочей смены (суток), $T_{см}, ч$	21,1	22,7	
Объемы погрузки и перевозок за смену, G , тыс. т	809,2	905	809,2
Количество выполненных рейсов, n_p	4046	4232	3781
Нагрузка на рейс, $m_{тр}, т$	200	214	
Время рейса самосвала, t_p , мин	27,2		
Количество рейсов каждого самосвала за смену, (n_p / N_c)	44,5	48,1	
Средневзвешенная вместимость ковша экскаватора, $\widetilde{E}_k^3, м^3$	24,15	23,3	
Средневзвешенная вместимость кузова самосвала, $\widetilde{E}_k^c, м^3$	116,85	126,5	
Расстояние транспортирования, $L_{тр}, км$	3,88	3,73	
Эксплуатационная скорость самосвалов, $\vartheta_3, км/ч$	16,44	15,80	
Функциональный критерий, λ	0,718	0,827	
Комплексный показатель качества работы ЭАК, k	1,092	1,157	

свалов – в 1,4 раза. Причина заключается в том, что, несмотря на сравнительно небольшое сокращение простоев техники, значительно возрастает время работы экскаваторов и самосвалов за счет существенного увеличения продолжительности рабочей смены (суток) и количества выполненных рейсов самосвалов.

В результате оптимального согласования показателей работы ЭАК разреза «Талдинский» увеличивается: функциональный критерий λ – на 15,2%, комплексный показатель качества работы ЭАК k – на 6,0%.

Корректировка численности парков ЭАК под требуемые объемы погрузки и перевозок на разрезе «Талдинский»

Из табл. 4 следует, что при оптимальной продолжительности рабочей смены (суток) за 22,7 часов 88 самосвалов с оптимальными параметрами могут вывезти 905,0 тыс. т горной массы. Фактически за это время на неоптимальном роботизированном разрезе «Талдинский» можно вывезти 809,2 тыс. т (сменное задание на 21,1 ч работы). Для того чтобы погрузить и перевезти 809,2 тыс. т горной массы вместо 905,0 тыс. т оптимальному ЭАК потребуется меньше 88 самосвалов. Для определения потребного количества самосвалов вначале определяется необходимое число рейсов по формуле:

$$n_p^{\text{треб}} = G^* / m_{тр}^* \quad (16)$$

где G^* – сменное задание при оптимальной продолжительности рабочей смены, т (905,0 тыс. т – потенциальное; 809,2 тыс. т – фактическое); $m_{тр}^*$ – оптимальная грузоподъемность самосвала, тонн (214 т).

Значение $n_p^{\text{треб}}$ составляет 4232 рейса для роботизированного ЭАК разреза с оптимальными параметрами (3781 рейс – для роботизированного неоптимального ЭАК). Деление полученных значений на $(n_p / N_c)^*$ (см. табл. 4) дает необходимую численность автотранспортного парка ЭАК:

$$N_c^{\text{треб}} = G^* / m_{тр}^* (n_p / N_c)^* \quad (17)$$

Сокращение численности автотранспортного парка позволяет сократить и численность экскаваторного парка. Соотношение численного состава парков самосвалов и экскаваторов $k'_N = N_c / N_3$ должно оставаться таким же, которое получено в результате оптимизации, то есть $k'_N = 6,3$. Таким образом,

$$N_3^* = N_c^* / k'_N \quad (18)$$

В результате расчетов получены требуемые численности экскаваторного и автотранспортного парков ЭАК разреза «Талдинский» (см. табл. 4).

Если учесть, что оптимизация работы роботизированного ЭАК разреза «Талдинский» (при оптимальных объемах погрузки и перевозок) дает сокращение численности с 91 до 88 самосвалов (на три машины), то для роботизированного неоптимального варианта это число составляет 12 [3+(88–79)] машин. Столь значительное сокращение численности обусловлено увеличением времени работы самосвалов в течение смены и соответствующим увеличением количества выполненных рейсов. Соответственно, сокращается и требуемая численность экскаваторного парка: вместо 14 потребуется 13 экскаваторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, численность экскаваторного и автотранспортного парков разреза «Талдинский» может быть снижена на 27,5%, в том числе: за счет роботизации – на 17,2%; за счет оптимизации показателей – на 10,3%. Настолько же может увеличиться суточная выработка ЭАК без изменения численности парков.

Список литературы • References

1. 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. 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.
2. Schmidt D. For the long haul. *Coal Age*, November 2014, pp. 26-29.
3. Сравнительная оценка качества действующих и роботизированных экскаваторно-автомобильных 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.
4. Brown C. Autonomous vehicle technology in mining. *Engineering & Mining Journal*. 2012;213(1):30-32.
5. Изменение показателей работы экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов Кузбасса при переходе на беспилотный автотранспорт / Ар.Ю. Воронов, Ю.Е. Воронов, С.Е. Наумов и др. / Россия молодая: материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием. Кемерово. 2024. С. 052504.1-052504.4.
6. Report 2 – Autonomous mining equipment. *New Technology & Innovation*. RFC Ambrian, May 2019. 36 p.
7. Golbasi O., Dagdelen K. Equipment replacement analysis of manual trucks with autonomous truck technology in open pit mines. *APCOM 38*. Golden, COL: Colorado School of Mines. 2017. pp. 19-9-19-20.
8. 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.
9. 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.
10. Козярук А.Е., Таранов С.И., Самолазов А.В. Направления повышения эффективности эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов на открытых горных работах // Горное оборудование и электромеханика. 2014. № 1(98). С. 6-11. Kozyaruk A.E., Taranov S.I., Samolazov A.V. Directions for improving the efficiency of operation of excavator-automobile complexes in open-pit mining. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika*. 2014;1(98):6-11. (In Russ.).
11. Зарипова С.Н. Оптимизация работы экскаваторно-автомобильных комплексов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2007. № 3. С. 104-109. Zaripova S.N. Optimization of the work of excavator-automobile complexes. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Gornyj zhurnal*. 2007;(3):104-109. (In Russ.).
12. Зиновьев В.В., Кузнецов И.С., Стародубов А.Н. Исследование человеко-машинного управления автосамосвалами в составе экскаваторно-автомобильного комплекса с применением имитационного моделирования // Уголь. 2021. № 7. С. 9-12. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-7-9-12. Sinoviev V.V., Kuznetsov I.S. & Starodubov A.N. Studies into man-machine control of dump trucks as part of excavator-and-truck complex using simulation modeling. *Ugol'*. 2021;(7):9-12. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2021-7-9-12.
13. Кузнецов И.С., Зиновьев В.В., Кузнецова А.В. Повышение точности и достоверности идентификации законов распределения хронометражных данных при моделировании экскаваторно-автомобильных комплексов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. № 3(145). С. 113-119. Kuznetsov I.S., Zinoviev V.V., Kuznetsova A.V. Improving the accuracy and reliability of the identification of the laws of the distribution of timing data in the modeling of excavator-automobile complexes. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2021;3(145):113-119. (In Russ.).
14. Журавлев А.Г., Глебов И.А., Черепанов В.А. Поиск резервов повышения производительности экскаваторно-автомобильных комплексов с применением компьютерного моделирования // Горная промышленность. 2023. № 6. С. 148-154. Zhuravlev A.G., Glebov I.A., Cherepanov V.A. Search for reserves to increase the productivity of excavator-automobile complexes using computer modeling. *Gornaya promyshlennost'*. 2023;(6):148-154. (In Russ.).

Authors Information

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

Voronov A.Yu. – PhD (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation, e-mail: voronovayu@kuzstu.ru

Dubinkin D.M. – PhD (Engineering), 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

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