

Воронов Антон Юрьевич¹, Хорешок Алексей Алексеевич², доктор техн. наук, профессор,
Воронов Юрий Евгеньевич², доктор техн. наук, профессор, **Ромашко Владимир Георгиевич²**,
 канд. техн. наук, **Воронов Артем Юрьевич²**, канд. техн. наук

¹АО «УК «Кузбассразрезуголь», 650054, Россия, г. Кемерово, Пионерский б-р, 4а

²Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

E-mail: a.voronov@krgu.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ РАЗРЕЗОВ ПО КРИТЕРИЮ КАЧЕСТВА

Аннотация: Одной из основных проблем экскаваторно-автомобильных комплексов (ЭАК) разрезов является достаточно низкий уровень качества их работы. Мощным средством повышения качества функционирования ЭАК является его оптимизация, осуществляемая по логико-математической модели, включающей целевую функцию и ограничения, накладываемые спецификой работы ЭАК и внешней горной средой. В качестве целевого критерия выбран обобщенный показатель качества функционирования ЭАК; в качестве оптимизируемых параметров – основные показатели качества ЭАК. В настоящее время разработана математическая модель оптимизации (ММО). Следующим этапом является ее исследование.

Цель работы. Оптимизация показателей работы ЭАК разрезов Кузбасса по критерию качества.

Методы исследования. Используются современные методы сбора и обработки данных, математического моделирования, анализа и синтеза.

Результаты. На основе разработанной математической модели оптимизации показателей качества функционирования ЭАК проведено исследование вопроса и анализ результатов моделирования. Установлено, что для достижения высокого качества работы ЭАК разрезов Кузбасса соотношение интенсивностей поступления самосвалов под погрузку и обслуживания их экскаваторами (функциональный критерий качества) должно быть минимально повышено на 25-30% и составлять $1,0 \pm 0,1$; соотношение численности автотранспортного и экскаваторного парков – не менее 6,5; время загрузки самосвала экскаватором – в пределах 3,5-4 мин; продолжительность рейса самосвала – 24-28 мин, что при расстояниях транспортирования горной массы 3-3,5 км позволяет повысить качество функционирования ЭАК разреза не менее чем на 30-35%.

Ключевые слова: экскаваторно-автомобильные комплексы; критерий качества эксплуатации; оптимизация показателей.

Информация о статье: принята 20 ноября 2020 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-6-19-24

В настоящее время существует достаточно большое количество моделей, исследующих ЭАК карьеров [1-4]. Однако нет достаточных методических и нормативных материалов, регламентирующих такое важнейшее направление повышения качества объектов, как их оптимизация. К настоящему времени вопросам оптимизации работы станков вращательного бурения, одноковшовых гидравлических экскаваторов, автотранспортной техники для разрезов, а также ЭАК посвящено несколько работ [5-9].

Математическая модель оптимизации (ММО) показателей функционирования ЭАК разрезов Кузбасса [9], полученная в результате проведения ряда математических экспериментов по методике, изложенной в работе [5], имеет вид:

$$k = -0,268 + 0,209k_N + 0,397t_p^e - 0,0415t_r \rightarrow \max;$$

$$0,130k_N + 0,230t_p^e - 0,0250t_r \geq 0,917;$$

$$0,130k_N + 0,230t_p^e - 0,0250t_r \leq 1,083;$$

$$t_p^e + 0,0619t_r \geq 4,822; \quad (1)$$

$$t_p^e + 0,0619t_r \leq 5,134;$$

$$k_N \geq 5,124;$$

$$k_N \leq 6,653;$$

$$k_N \geq 0; t_p^e \geq 0; t_r \geq 0,$$

где k – обобщенный показатель качества функционирования ЭАК (критерий оптимизации); k_N (коэффициент эффективного состава ЭАК), t_p^e (время загрузки самосвала экскаватором), t_r (продолжительность рейса самосвала) – оптимизируемые параметры.

Таблица. Симплекс-таблица оптимального решения

Величина	Свободный член	Свободные переменные		
		y_2	y_4	y_5
k	1,385	1,684	0,00980	0,00990
Базисные переменные				
k_N	5,124	0	0	
t_p^e	3,929	1,578	0,637	-1
t_r	19,467	-25,489	5,860	0,205
y_1	0,166	1	0	-3,313
y_3	0,312	0	1	0
y_6	1,529	0	0	0
				1

Наиболее распространенным методом решения задач линейного программирования является симплекс-метод, идея которого состоит в приведении исходной задачи к каноническому виду. Каноническая задача включает в себя целевую функцию и ограничения, записанные не в виде неравенств, а в форме уравнений. Для симплекс-метода существует стандартный алгоритм решения и вычислительные программы. Однако по ходу решения задачи обнаруживается много интересных исследовательских моментов (особенно при анализе симплекс-таблиц), которые требуют ручного (немашинного) решения. Такой подход и использован нами.

К каноническому виду можно привести любую задачу линейного программирования путем введения дополнительных переменных. Представив ограничения из математической модели оптимизации (1) в виде уравнений:

$$\begin{cases} 0,130k_N + 0,230t_p^e - 0,0250t_r - y_1 = 0,917; \\ 0,130k_N + 0,230t_p^e - 0,0250t_r + y_2 = 1,083; \\ t_p^e + 0,0619t_r - y_3 = 4,822; \\ t_p^e + 0,0619t_r + y_4 = 5,134; \\ k_N - y_5 = 5,124; \\ k_N + y_6 = 6,653, \end{cases}$$

разделив в них переменные в соответствии с [10] на базисные и свободные и проведя элементарные преобразования, предусмотренные симплекс-методом, получим модель (1) в виде:

$$\begin{cases} k = 1,370 - (1,684y_2 + 0,00980y_4 + 0,00990y_5) \rightarrow \max; \\ k_N = 5,124 - (y_5); \\ t_p^e = 3,929 - (1,578y_2 + 0,637y_4 + 0,205y_5); \\ t_r = 19,467 - (-25,489y_2 + 5,860y_4 + 3,313y_5); \\ y_1 = 0,166 - (y_2); \\ y_3 = 0,312 - (y_4); \\ y_6 = 1,529 - (y_5), \end{cases} \quad (2)$$

где k_N, t_p^e, t_r – основные базисные переменные; y_1, y_3, y_6 – дополнительные базисные переменные; y_2, y_4, y_5 – свободные переменные.

Систему (2) можно представить в виде симплекс-таблицы, которая является основой для решения задачи линейного программирования.

Признаки допустимого и оптимального решений для задачи, записанной в виде симплекс-таблицы, формулируются следующим образом.

Решение является допустимым, если в симплекс-таблице в столбце свободных членов все значения, относящиеся к базисным переменным, будут неотрицательными. Признак оптимального решения в случае максимизации целевой функции звучит так: целевая функция имеет максимальное значение, если, во-первых, решение является допустимым, и, во-вторых, все элементы в строке целевой функции будут неотрицательными [9]. Заметим, что в симплекс-таблице представлено оптимальное решение:

$$k_N^* = 5,124; t_p^{e*} = 3,929 \text{ мин}; t_r^* = 19,467 \text{ мин}; \lambda^* = 1,034; k^* = 1,385. \quad (3)$$

Согласно теореме о двойственности задач линейного программирования [10], если дополнительная переменная является базисной, то ее двойственная оценка, отражающая влияние на целевую функцию изменения соответствующего ограничения, для которого введена эта дополнительная переменная, равна нулю. Если же дополнительная переменная является свободной, то ее двойственная оценка не равна нулю и может быть определена по симплекс-таблице на пересечении строки целевой функции со столбцом данной дополнительной переменной. Так, для верхнего ограничения по функциональному критерию при $y_2 = 0$ двойственная оценка равна 1,684; для верхнего ограничения по взаимосвязи показателей t_p^e и t_r при $y_4 = 0$ двойственная оценка составляет 0,00980, а для нижнего ограничения по производительности при $y_5 = 0 - 0,00990$. Это означает, что при ужесточении требования по производительности $\sum S_0^{\Pi}$ на единицу обобщенный показатель технического уровня k уменьшится на 0,00990, то есть на 0,7%; при ужесточении требования по функциональному критерию $\sum S_0^{\Lambda}$ на 0,1 (в сопоставимых с $\sum S_0^P$ единицах) – на 0,168 (12,2%), а при ужесточении требования по взаимосвязи показателей $\sum S_0^t$ на единицу – на 0,00980 (0,7%). Из этого следует, что ограничение по функциональному критерию в 17,5 раз более значимо, чем ограничение по производительности и взаимосвязи показателей, которые в данном случае равнозначны.

Диапазон, в пределах которого действуют указанные двойственные оценки, определен по методике, изложенной в работе [5], и составляет:

$$\begin{cases} 0,166 \geq \Delta S_0^\lambda \geq 0; \\ 0,312 \geq \Delta S_0^t \geq 0; \\ 1,529 \geq \Delta S_0^{PEAK} \geq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Изменение ограничений в этих пределах не меняет структуры оптимального решения, то есть не требует изменения вида и параметров ММО (1).

Имея допустимые пределы изменения ограничений (4), можно определить их значимость, то есть установить степень влияния каждого из них на оптимальное решение. Для этого нужно значение соответствующего ΔS из (4) помножить на соответствующий коэффициент в строке целевой функции k из таблицы: в столбце (y_2), отвечающем за ограничение по функциональному критерию λ , – на ΔS_0^λ ; в столбце (y_4), отвечающем за ограничение по взаимосвязи показателей ($t_p^e \div t_r$), – на ΔS_0^t ; в столбце (y_5), отвечающем за ограничение по производительности ЭАК P_{EAK}^{ud} , – на ΔS_0^{PEAK} . Тогда ограничение по функциональному критерию λ равно 0,280; ограничение по взаимосвязи t_p^e и t_r – 0,00306; ограничение по производительности P_{EAK}^{ud} – 0,0151. Полученные цифры означают, что предельное ужесточение ограничения по функциональному критерию приведет к снижению оптимального значения целевой функции (обобщенного показателя качества k) на 0,280, то есть с 1,385 до 1,105 (на 20,2%); максимальное ужесточение ограничения по взаимосвязи показателей t_p^e и t_r – к снижению обобщенного показателя k на 0,00306 (с 1,385 до 1,382; на 0,22%); ограничения по производительности – на 0,0151 (с 1,385 до 1,370; 1,1%). Отсюда следует, что влияние на целевой критерий k ограничения по функциональному критерию λ в 18,4 раза более значимо, чем ограничения по производительности P_{EAK}^{ud} , и в 92 раза – чем влияние ограничения по взаимосвязи показателей ($t_p^e \div t_r$).

Предельное ужесточение всех ограничений приведет к ухудшению качества на 0,298 ед., то есть значение k будет составлять 1,087. Это на 19,1% выше показателя лучшего разреза «Краснобродский» ($k = 0,879$), и на 34,2% лучше, чем в целом по УК «Кузбассразрезуголь» ($k = 0,614$) [11].

Аналогично, используя данные симплекс-таблицы, можно определить пределы изменения оптимизируемых показателей k_N , t_p^e и t_r .

Значение k_N может быть увеличено максимально на 1,529 ед., то есть с 5,124 до 6,653 (на 23,0%) за счет изменения ограничения по производительности ЭАК, и структура оптимального решения при этом останется без изменений. Другие ограничения на значение k_N влияния не оказывают. Таким образом, значение $k_N = 6,653$ – это оптимизации максимально возможное значение, исходя из условия данной задачи. Однако

если значение k_N увеличено до 6,653, изменятся значения и других оптимизируемых показателей: t_p^e будет составлять уже 3,616 мин, а t_r – 24,533 мин.

Такая же, только обратная ситуация складывается и с показателем t_p^e , за исключением того лишь, что на величину t_p^e оказывают влияние все ограничения. Значение t_p^e может быть только уменьшено. Суммарно это составляет 0,774, в том числе за счет изменения требования по функциональному критерию – на 0,262 (с 3,929 до 3,667 мин); по взаимосвязи показателей t_p^e и t_r – еще на 0,199 (до 3,468 мин); по производительности ЭАК – еще на 0,313 (до 3,155 мин). Таким образом, значение t_p^e может быть уменьшено с 3,929 до 3,155 мин (на 19,8%) без изменения структуры оптимального решения. При этом ужесточение ограничения по производительности ЭАК P_{EAK}^{ud} оказывает в 1,2 раза большее влияние на t_p^e , чем ограничения по функциональному критерию λ , и в 1,6 раза – чем по взаимосвязи показателей t_p^e и t_r .

Значение продолжительности рейса самосвала t_r в отличие от двух других оптимизируемых показателей может быть и уменьшено, и увеличено. Уменьшено оно может быть за счет изменения ограничения по взаимосвязи показателей t_p^e и t_r , а увеличено за счет изменения ограничений по функциональному критерию λ и производительности ЭАК P_{EAK}^{ud} . Значение продолжительности рейса t_r может быть максимально уменьшено по сравнению с оптимальным значением $t_r^* = 19,467$ мин на 1,828 (то есть с 19,467 до 17,639 мин), но и максимально увеличено на 9,297 (то есть с 19,467 до 28,764 мин). Максимально возможное значение продолжительности рейса, исходя из условий данной задачи, может составлять $t_r^{max} = 28,764$ мин.

Таким образом, оптимизируемые показатели могут изменяться в пределах:

$$\begin{cases} k_N = 5,124 \div 6,653; \\ t_p^e = 3,155 \div 3,929; \\ t_r = 17,64 \div 28,76, \end{cases} \quad (5)$$

и это не повлияет на структуру оптимального решения. Изменяться может только соотношение оптимизируемых показателей, величины функционального критерия λ^* и обобщенного показателя качества функционирования ЭАК k^* . Значения оптимизируемых показателей, выходящие за пределы указанных диапазонов (5), не являются оптимальными в любом случае, поскольку эти фактические значения не соответствуют существующим взаимосвязям показателей функционирования ЭАК, то есть не отвечают принципу системности.

Оптимальное решение (3) имеет то преимущество, что требует меньшего количества самосвалов для обслуживания имеющихся экскаваторов. Поскольку это достигается за счет более высокой оборачиваемости самосвалов, за это нужно «заплатить» весьма жестким с точки зрения

возможности достижения значением продолжительности рейса: $t_r^* = 19,467$ мин. Такое значение t_r в настоящее время достигнуто только на одном разрезе «Моховский» ($t_r = 17,746$ мин), но расстояние транспортирования L_{tr} на этом разрезе составляет всего 2,06 км. На всех остальных разрезах расстояния транспортирования гораздо больше (от 3,49 км на разрезе «Кедровский» до 5,79 км на разрезе «Бачатский»).

В то же время, если оптимальным считать значение k_N , равное не 5,124, а 6,653 (см. таблицу), то ему будет соответствовать значение $t_p^e = 3,616$ мин, и $t_r = 24,533$ мин. Значение функционального критерия λ будет составлять уже не 1,034 (3), как в оптимальном решении, а 0,981 (на 5,1% ниже). Значение обобщенного показателя качества k при этом будет составлять не 1,385 (3), а 1,370, то есть на 1,3% ниже, что с практической точки зрения незначительно.

Тогда оптимальными будут следующие значения оптимизируемых показателей и целевого критерия:

$$k_N^* = 6,653; t_p^{e*} = 3,616 \text{ мин}; t_r^* = 24,533 \text{ мин}; \lambda^* = 0,981; k^* = 1,370. \quad (6)$$

Решение (6) представляется более предпочтительным. Оно не является строго оптимальным ($k = 1,370$ вместо $k^* = 1,385$), однако это снижение целевого критерия незначительно. Немного снижается и значение функционального критерия (с $\lambda^* = 1,034$ до $\lambda = 0,981$), что все равно близко к идеальному значению ($\lambda = 1,0$). При этом еще остается запас для увеличения допустимой продолжительности рейса t_r . Решение (6) дает большие преимущества в плане продолжительности рейса самосвалов. Оно составляет $t_r = 24,533$ мин, что уже ближе к фактическим значениям этого показателя на разрезах «Кедровский», «Талдинский» и «Калганский». В результате число разрезов, где уже имеют место допустимые продолжительности рейса самосвалов, расширяется с 1 до 4. При необходимости значениями оптимизируемых показателей в пределах диапазонов (5) можно варьировать, однако не произвольно, а с учетом взаимосвязей, зафиксированных в симплекс-таблице оптимального решения. Определившись с необходимым значением показателя k_N (очевидно, его следует принимать максимально возможным – $k_N = 6,653$), можно будет в заданных пределах (5) варьировать значениями показателей t_p^e и t_r , не меняя k_N , поскольку ограничения, определяющие эти показатели, на значение k_N влияния не оказывают.

Например, в решении (6) мы считаем, что продолжительность рейса должна составлять не 24,533 мин, а $t_r = 28,0$ мин (находится в допустимых пределах (5)). Это можно сделать за счет изменения ограничения по функциональному критерию (см. таблицу): 0,136 (максимальное изменение по (5) – 0,166). Тогда значение t_p^e будет составлять: $t_p^e = 3,401$ мин; значение

функционального критерия – $\lambda = 0,808$, а целевого критерия – $k = 1,141$.

Если такие значения оптимизируемых показателей и функционального критерия удовлетворяют, оптимальное решение будет следующим: $k_N^* = 6,653$; $k_p^{e*} = 3,401$ мин; $t_r^* = 28,0$ мин; $\lambda^* = 0,808$; $k^* = 1,141$. Следует отметить, однако, что значение λ все-таки является недостаточным. Допустимым является значение $\lambda = 1,0 \pm 0,1$.

Оптимальное решение (6) свидетельствует о том, что значение функционального критерия λ выше максимального из достигнутых для разреза «Талдинский» ($\lambda = 0,704$) на 28,2%; значение обобщенного показателя качества функционирования ЭАК k выше максимального из достигнутых на разрезе «Краснобродский» ($k = 0,879$) на 35,8%.

Поскольку действия с оптимизируемыми параметрами в рамках системы запаса по ограничению (5) не меняют структуры оптимального решения, все вариационные расчеты представляют достаточно простую задачу, что позволяет достаточно быстро и легко оценивать принимаемые решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cetin, N. Open-pit truck/shovel haulage system simulation: PhD thesis. – Middle East Technical University, Ankara, 2004.
2. Krause, A. J. Shovel-truck cycle simulation methods in surface mining: M. S. thesis. – University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2006.
3. Stout, C. E. Simulation of a large multi-pit mining operation: MSc thesis. – The University of Montana, Missoula, 2011.
4. Вуейкова, О. Н. Обоснование рациональной структуры автомобильно-экскаваторного комплекса открытого горнорудного карьера : дис. ... канд. техн. наук. – ЮУрГУ, Оренбург, 2013.
5. Воронов, Ю. Е. Оптимальное проектирование карьерных горных машин. – М. : Инновационное машиностроение, 2015. – 351 с.
6. Voronov, Y. Functional quality criterion of rock handling mechanization at open-pit mines / Y. Voronov, A. Voronov // The IInd International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment), Kemerovo, Russian Federation, November 20-22, 2017. – E3S Web of Conferences, Volume 21.
7. Воронов, Ю. Е. Функциональный критерий качества функционирования карьерного экскаваторно-автомобильного комплекса / Ю. Е. Воронов, А. А. Хорешок, Артем Ю. Воронов, Н. А. Стенина, Антон Ю. Воронов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2019. – № 3. – С. 54-60.
8. Зарипова, С. В. Оптимизация работы экскаваторно-автомобильных комплексов // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – № 3. – С. 105-108.

9. Воронов, А. Ю. Математическая модель оптимизации работы карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 2(148). – С. 13-18.

10. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

11. Воронов, Антон Ю. Оценка качества работы экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов Кузбасса / Антон Ю. Воронов, А. А. Хорешок, Ю. Е. Воронов, А. В. Буянкин, Артем Ю. Воронов // Горное оборудование и электромеханика. – 2020. – № 2(148). – С. 19-26.

Voronov Anton Y.¹, Khoreshok Alexey A.², Dr. Sc. in Engineering, Professor, Voronov Yuri E.², Dr. Sc. in Engineering, Professor, Romashko Vladimir G.², C. Sc. in Engineering, Voronov Artyom Y.², C. Sc. in Engineering

T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

OPTIMIZING THE INDICATORS OF THE SHOVEL-TRUCK SYSTEM OPERATION AT OPEN-PIT COAL MINES BY QUALITY CRITERION

Abstract: *The urgency of the discussed issue. One of the main problems of shovel-truck systems (STS) at open-pit coal mines is a rather low level of their operation quality. A powerful means of improving the STS operation quality is its optimization, carried out according to the logical-mathematical model, which includes the objective function and restrictions imposed by the STS operation specifics and the external mining environment. The generalized indicator of the STS operation quality was chosen as the objective criterion; and the main STS quality indicators were chosen as the optimized parameters. At present, the mathematical optimization model (MOM) has been developed. The next step is to research it.*

The main aim of the study. *Optimization of the STS performance indicators at Kuzbass open-pit coal mines by quality criterion.*

The methods used in the study. *Modern methods of data collection and processing, mathematical modeling, analysis and synthesis were used.*

The results. *On the basis of the developed mathematical model for optimizing the STS operation quality indicators, a study of the problem and analysis of the simulation results were carried out. We defined that in order to achieve a high quality of the STS operation at Kuzbass open-pit coal mines, the ratio of the rates of truck arriving to shovel and loading (functional quality criterion) should be increased by at least 25–30% and be $1,0 \pm 0,1$; the ratio of the number of truck and shovel fleets should be at least 6,5; truck loading time – within 3,5–4 minutes; truck cycle time – within 24–28 minutes, which, at a material transportation distance of 3–3,5 km, makes it possible to improve the STS operation quality by at least 30–35%.*

Keywords: *shovel-truck systems; operation quality criterion; optimization of indicators.*

Article info: *received November 20, 2020*

DOI: *10.26730/1816-4528-2020-6-19-24*

REFERENCES

1. Cetin, N. Open-pit truck/shovel haulage system simulation. PhD thesis. Ankara: Middle East Technical University, 2004.

2. Krause, A. J. Shovel-truck cycle simulation methods in surface mining. MSc thesis. Johannesburg: University of the Witwatersrand, 2006.

3. Stout, C. E. Simulation of a large multi-pit mining operation. MSc thesis. Missoula: The University of Montana, 2011.

4. Vuykova, O. N. Obosnovanie ratsionalnoi struktury avtomobilno-ekskavatornogo kompleksa otkrytogo gornorudnogo kariera [Justification of the rational structure of the truck-shovel system at an

open-pit ore mine]. PhD thesis. Orenburg: SUrSU, 2013. (rus)

5. Voronov, Y. E. Optimalnoe proektirovanie gornyh kariernyh mashin [Optimal design of open-pit mining machines]. Moscow: Innovative Engineering, 2015. 351 p. (rus)

6. Voronov, Yu. Functional quality criterion of rock handling mechanization at open-pit mines / Yu. Voronov, A. Voronov // The IInd International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment). Kemerovo, Russian Federation, November 20-22, 2017. E3S Web of Conferences, Volume 21.

7. Voronov, Y. E. Funktsionalnyj kriterij kachestva funktsionirovaniya kariernogo

экскаваторно-автомобильного комплекса [Functional quality criterion of the shovel-truck system operation at open-pit mine] / Y. E. Voronov, A. A. Khoreshok, Artyom Y. Voronov, N.A. Stenina, Anton Y. Voronov // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2019. № 3. P. 54-60. (rus)

8. Zaripova, S. V. Optimizatsiya raboty ekskavatorno-avtomobilnykh kompleksov [Optimization of the shovel-truck system operation]. University news. Mining journal. 2007. № 3. P. 105-108. (rus)

9. Voronov, A. Y. Matematicheskaja model optimizatsii raboty kariernykh ekskavatorno-avtomobilnykh kompleksov [A mathematical model for optimization of mining shovel-truck system operation] //

Mining Equipment and Electromechanics. 2020. № 2(148). P. 13-18. (rus)

10. Bronshtein, I. N. Spravochnik po matematike dlja inzhenerov i uchashchihsja vtuzov [Math handbook for engineers and technical tertiary students] / I.N. Bronshtein, K. A. Semendjaev. Moscow: Science, 1986. 544 p. (rus)

11. Voronov, Anton Y. Otsenka kachestva raboty ekskavatorno-avtomobilnykh kompleksov razrezov Kuzbassa [Assessment of the operation quality of shovel-truck systems at open-pit coal mines in Kuzbass] / Anton Y. Voronov, A. A. Khoreshok, Y. E. Voronov, A. V. Bujankin, Artyom Y. Voronov // Mining Equipment and Electromechanics. 2020. № 2(148). P. 19-26. (rus)

Библиографическое описание статьи

Воронов А.Ю., Хорешок А.А., Воронов Ю.Е., Ромашко В.Г., Воронов А.Ю. Оптимизация показателей функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов по критерию качества // Горное оборудование и электромеханика – 2020. – № 6 (152). – С. 19-24.

Reference to article

Voronov A.Y., Khoreshok A.A., Voronov Yu.E., Romashko V.G., Voronov A.Y. Optimizing the indicators of the shovel-truck system operation at open-pit coal mines by quality criterion. Mining Equipment and Electromechanics, 2020, no.6 (152), pp. 19-24.