

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

DOI: 10.26730/1999-4125-2019-3-54-60

УДК 622.23.05

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

FUNCTIONAL QUALITY CRITERION OF THE SHOVEL-TRUCK SYSTEM OPERATION AT OPEN-PIT MINE

Воронов Юрий Евгеньевич¹,

доктор техн. наук, профессор, e-mail: vyue.ap@kuzstu.ru

Voronov Yuri E.¹, Dr. Sc. in Engineering, Professor,

Хорешок Алексей Алексеевич¹,

доктор техн. наук, профессор, e-mail: haa.omit@kuzstu.ru

Khoreshok Alexey A.¹, Dr. Sc. in Engineering, Professor,

Воронов Артем Юрьевич¹,

кандидат техн. наук, e-mail: voronovayu@kuzstu.ru

Voronov Artyom Y.¹, Ph. D. in Engineering

Стенина Наталья Александровна¹, кандидат техн. наук, e-mail: steninana@kuzstu.ru

Stenina Natalia A.¹, Ph. D. in Engineering

Воронов Антон Юрьевич²,

e-mail: a.voronov@kru.ru

Voronov Anton Y.²

¹Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

²АО «УК «Кузбассразрезуголь», 650054, Россия, г. Кемерово, Пионерский б-р, 4а

¹T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennyya, Kemerovo, 650000, Russia

²АО «УК «Kuzbassrazrezugol», 4a avenue Pionersky, Kemerovo, 650054, Russia

Аннотация:

Вскрышные и добычные работы на карьерах выполняются преимущественно мощными экскаваторно-автомобильными комплексами (ЭАК). Одной из основных проблем ЭАК является достаточно низкий уровень качества их функционирования, в основном из-за несбалансированности влияния различных факторов на эффективность совместной работы экскаваторов и самосвалов в составе ЭАК. В данной статье сформулирован, выведен и проанализирован функциональный критерий оценки качества функционирования ЭАК карьеров. Представлено обоснование, общие принципы формирования функционального критерия, его общий вид для смешанных (разномарочных) парков самосвалов и экскаваторов, характерных для современных карьерных ЭАК. Для этого использованы современные методы сбора и обработки данных, математического моделирования, анализа и синтеза. Возможность оценки качества функционирования ЭАК имеет большое значение для выявления основных направлений повышения их эксплуатационной производительности и качества работы, выхода на оптимизацию основных показателей функционирования по критерию качества, и, как итог, для возможной экономии материально-технических ресурсов при добыче полезных ископаемых открытым способом. Повышение качества функционирования ЭАК также позволит повысить безопасность горных работ и сократить вредные выбросы в атмосферу – за счет возможного сокращения числа работающих самосвалов.

Ключевые слова: открытые горные работы; экскаваторно-автомобильный комплекс; производительность; качество работы; безопасность горных работ; функциональный критерий.

Abstract:

Stripping and mining operations in open-pit mines are performed mainly by powerful shovel-truck systems (STSs). One of the main problems of the STSs is the rather low level of their operating quality, mainly due to the imbalance of the influence of various factors on the efficiency of joint work of shovels and haul trucks as parts of the STS. A functional criterion for assessing the quality of the STS operation at open-pit mines is formulated, derived and analyzed in this article. The rationale, the general principles of the functional criterion formation, its general form for mixed (heterogeneous) truck and shovel fleets, typical of modern mining STSs, are presented. For this purpose, modern methods of data collection and processing, mathematical modeling, analysis and synthesis are used. The ability to assess the quality of the STS operation is of great importance for identifying the main directions of improving their operational performance and operating quality, optimizing the main performance indicators by the quality criterion, and, as a result, for possible saving of material and technical resources for open-pit mining. Improving the quality of the STS operation will also improve the mining safety and reduce harmful emissions into the atmosphere – by means of possible reduction in the number of operating trucks.

Key words: open-pit mining; shovel-truck system; productivity; mining safety; functional criterion.

Поскольку качество функционирования ЭАК может проявиться только в процессе выполнения им своей функции в соответствии с назначением – своевременной выемке, погрузке и вывозе горной массы в определенных условиях, – работу ЭАК как единой системы в составе горнодобывающего предприятия следует рассматривать как результат взаимодействия составляющих его элементов (карьерных экскаваторов и самосвалов) при ограничениях, накладываемых внешней горной средой. Основной целью оценки качества взаимодействия карьерных экскаваторов и самосвалов в составе ЭАК является установление того, насколько эффективно каждый из них выполняет свою функцию в конкретных условиях. Для такой оценки необходимо иметь функциональный критерий совместной работы экскаваторов и самосвалов в составе ЭАК. Функциональный критерий является основой для разработки методики безэкспертной оценки качества функционирования карьерных ЭАК. Такой подход уже реализован в ряде работ [1–4].

Проблеме определения рациональной структуры ЭАК посвящено большое количество работ, например [5–10]. В них отмечается, что с точки зрения совместной работы карьерных экскаваторов и самосвалов основным назначением экскаваторов, являющихся ведущими машинами комплекса, является обеспечение высокой производительности ЭАК; основным назначением самосвалов – способность обеспечить достижение этой производительности, то есть работа парков экскаваторов и самосвалов должна быть максимально сбалансирована. Сбалансировать суммарную производительность имеющихся на предприятии N_e экскаваторов при помощи необходимого для этого количества N_s самосвалов возможно путем сопоставления фактической производительности парка экскаваторов с потенциальной (теоретической) производительностью парка самосвалов.

Суммарную сменную (суточную) эксплуатационную производительность (выработку) экскаваторного парка ЭАК можно определить по формуле

[м³/смену (сутки)]:

$$P_{\Sigma}^e = \frac{E_k^e}{t_c^e} \cdot N_e \cdot T_{sm} \cdot k_{EAK},$$

(1)

где E_k^e – емкость ковша экскаватора, м³; t_c^e – продолжительность одного цикла экскаватора (время погрузки одного ковша), мин; N_e – количество экскаваторов в ЭАК; T_{sm} – продолжительность рабочей смены (суток), ч; k_{EAK} – коэффициент эксплуатационной производительности ЭАК.

Коэффициент эксплуатационной производительности k_{EAK} представляет собой отношение времени чистой работы карьерных экскаваторов и самосвалов к продолжительности смены с учетом всех регламентированных и неплановых простоев. После преобразований он может быть представлен как [11]:

$$k_{EAK} = 1 - \frac{\sum_{1}^{N_e} t_{pr}^e + \sum_{1}^{N_s} t_{pr}^s}{T_{sm}(N_e + N_s)},$$

(2)

где $\sum_{1}^{N_e} t_{pr}^e$, $\sum_{1}^{N_s} t_{pr}^s$ – суммарные простои N_e экскаваторов и N_s самосвалов в течение рабочей смены (суток), ч.

В $\sum_{1}^{N_s} t_{pr}^s$ не включаются простои самосвалов в ожидании погрузки. Они включены в продолжительность рейса самосвала.

Суммарная теоретическая производительность парка карьерных самосвалов (N_s единиц) составляет [м³/смену (сутки)]:

$$P_{\Sigma}^s = \frac{E_k^s}{t_r} \cdot N_s \cdot T_{sm},$$

(3)

где E_k^s – вместимость кузова самосвала, м³;
 t_r – время рейса самосвала от окончания предыдущей погрузки до начала следующей с учетом простоев в ожидании погрузки, ч;
 N_s – количество самосвалов в ЭАК.

Соотношение этих производительностей (P_Σ^s и P_Σ^e) в наибольшей степени характеризует сбалансированность совместной работы парков карьерных самосвалов и экскаваторов, а, следовательно, может служить функциональным критерием оценки качества функционирования ЭАК. Имеем

$$\lambda = \frac{P_\Sigma^s}{P_\Sigma^e} = \frac{E_k^s \cdot N_s \cdot T_{sm} \cdot t_c^e}{E_k^e \cdot N_e \cdot T_{sm} \cdot t_r \cdot k_{EAK}}$$

Учитывая, что $\frac{E_k^s}{E_k^e} = n_k$ – количество ковшей, загружаемых в кузов самосвала, а $t_c^e \cdot n_k = t_p^e$ – время полной загрузки кузова самосвала данным экскаватором, после преобразований получим:

$$\lambda = \frac{N_s}{\frac{N_e}{t_p^e} \cdot t_r \cdot k_{EAK}} \quad (4)$$

Если не учитывать простои экскаваторов и самосвалов, зависимость (4) вырождается в $\frac{N_s \cdot t_c^e}{N_e \cdot t_r}$, которая исследована в работах [12–16] и названа их авторами сравнительным фактором.

Фактически функциональный критерий λ (4) представляет собой соотношение интенсивности поступления самосвалов под погрузку λ_s и интенсивности обслуживания их экскаваторами λ_e . Если $\lambda = 1$, то существует некая точка равновесия, когда самосвалы прибывают к экскаваторам с той же интенсивностью, с какой обслуживаются ими. Если $\lambda > 1$, то самосвалы прибывают быстрее, чем обслуживаются, поэтому следует ожидать возникновения очередей самосвалов. $\lambda < 1$ показывает, что экскаваторы работают быстрее, чем прибывают самосвалы, и тогда вероятны простои экскаваторов в ожидании прибытия самосвалов.

Зависимость (4) предполагает, что поступление самосвалов под погрузку осуществляется равномерно, то есть каждый последующий самосвал прибывает под погрузку ровно в тот момент времени, когда освобождается предыдущий. Однако добиться абсолютно-равномерного движения самосвалов в карьере практически невозможно из-за большого числа непредвиденных факторов. В результате, даже если количества самосвалов в ЭАК

достаточно, чтобы обеспечить вывоз всей горной массы, погружаемой имеющимися экскаваторами в течение смены (суток), простои и экскаваторов, и самосвалов все равно будут возникать из-за неравномерности прибытия самосвалов под погрузку. Большое влияние оказывает используемая на предприятии стратегия распределения карьерных самосвалов между экскаваторами (организация работы с жестким закреплением самосвалов за конкретными экскаваторами, без закрепления вообще, по комбинированной схеме). Есть и множество других аспектов, присущих данному конкретному предприятию, в частности, возможность непредвиденного взаимодействия самосвалов в точках пересечения карьерных автодорог, невозможность обгона (может привести к заторовым ситуациям), различное качество различных участков дорог; плохое дробление горной массы при буровзрывных работах может привести к удлинению цикла погрузки, различная степень изношенности машин и квалификации водителей влияет на скоростные характеристики самосвалов.

Зависимость (4) предполагает также, что парки погрузочно-транспортного горного оборудования являются однородными, то есть используется только один типоразмер карьерных самосвалов и экскаваторов. Попытка рассмотреть различные варианты состава и структуры парков при определении функционального критерия была сделана в работе [17]. Однако на практике чаще всего встречаются смешанные (разномарочные) парки техники. Поэтому можно ограничиться рассмотрением лишь смешанных парков техники, для чего в формуле (4) целесообразно пользоваться средневзвешенными величинами соответствующих показателей. Они определяются следующим образом.

Вначале нужно определить время, необходимое каждому экскаватору для обслуживания работающих с ним самосвалов. Время погрузки само-

свалов (t_{pj}^e) для каждого j -го экскаватора определяется как

$$t_{pj}^e = \sum_{i=1}^{N_s} t_{pij}^e \cdot N_{si}, \quad (5)$$

где t_{pij}^e – время загрузки j -м экскаватором i -го самосвала.

Тогда интенсивность обслуживания всех самосвалов всеми экскаваторами будет равна

$$\lambda_e = \sum_{j=1}^{N_e} \left(\frac{N_{ej}}{t_{pj}^e} \right) \cdot N_s \cdot k_{EAK}. \quad (6)$$

Интенсивность поступления самосвалов под погрузку определится как (авт./мин):

$$\lambda_s = \frac{N_s}{t_r}, \quad (7)$$

Таблица. Сводный отчет о работе ЭАК разреза «Кедровский»
Table. Summary report on the operation of the STS at Kedrovsky cut

Объекты, Показатели	Простои самосвалов, t_{pr}^s , мин	Простои экскаваторов, t_{pr}^e , мин	Время погрузки, t_p^e , мин	Продолжительность рейса самосвалов, t_r , мин	Время рейса с учетом простоев техники, $(t_r + t_{pr}^e)$, мин
БелАЗ-75131 (2 единицы)	1	2	3	4	5
Работа с ЭШ-10/70 (1 ед., 101 рейс)	30,6	426,0	754,9	1481,1	1937,7
<i>Итого сумма по группе машин</i>	<i>30,6</i>	<i>426,0</i>	<i>754,9</i>	<i>1481,1</i>	<i>1937,7</i>
Итого за рейс (101 рейс)	0,303	4,217	7,474	14,665	19,185
БелАЗ-76306 (29 единиц)	1	2	3	4	5
Работа с R 9200 (1 ед., 145 рейсов)	315,5	192,0	529,3	4222,3	4879,3
Работа с ЭКГ-10 (1 ед., 111 рейсов)	241,5	0	624,4	3451,4	3954,3
Работа с ЭКГ-12 (1 ед., 119 рейсов)	258,9	258,0	496,9	3527,7	4066,9
Работа с ЭКГ-15 (2 ед., 200 рейсов)	435,1	888,0	807,6	5901,4	6807,6
Работа с Р&Н-2800 (2 ед., 388 рейсов)	844,2	930,0	790,7	10672,7	12430,6
<i>Итого сумма по группе машин</i>	<i>2095,2</i>	<i>2268,0</i>	<i>3248,9</i>	<i>27775,5</i>	<i>32138,7</i>
Итого за рейс (963 рейса)	2,176	2,355	3,374	28,843	33,374
Всего по разрезу, в том числе:	2125,8	2694,0	4003,7	29256,8	34076,6
– на 1 экскаватор (8 единиц)		336,8	500,5		
– на 1 самосвал (31 единица)	68,6	86,9	129,2	943,8	1099,2
– на 1 рейс (1064 рейса)	1,998	2,532	3,763	27,497	(18,32 ч)

где \bar{t}_r – усредненное время рейса (включая простой в ожидании погрузки) для всех самосвалов за смену (сутки), мин.

Поскольку парк самосвалов смешанный, целесообразно использовать индивидуальные значения времени цикла самосвалов, то есть в формуле (7) вместо среднего времени надо применять средневзвешенные значения индивидуальных продолжительностей цикла самосвалов.

Имеем зависимость

$$\bar{t}_r = \frac{\sum_{i=1}^{N_s} (t_{r_i} \cdot N_{s_i})}{N_s}, \quad (8)$$

где t_{r_i} – время рейса i -го самосвала, мин.

Поскольку функциональный критерий λ – это отношение интенсивности поступления самосвалов под погрузку к интенсивности обслуживания их экскаваторами, то, поделив выражение (7) на выражение (6) и подставив соответствующие выражения (5) и (8), получим:

$$\lambda = \frac{N_s}{\sum_{i=1}^{N_s} \left[\frac{N_{e_j}}{\sum_{j=1}^{N_s} (t_{p_{ij}}^e \cdot N_{s_i})} \right] \cdot \sum_{i=1}^{N_s} (t_{r_i} \cdot N_{s_i}) \cdot k_{EAK}}. \quad (9)$$

Нетрудно заметить, что выражение для определения функционального критерия λ (9) является расширенным (индивидуализированным) вариантом исходной зависимости (4).

В зависимости (9) основополагающими являются четыре неизвестных величины:

$t_{p_{ij}}^e$ – продолжительность загрузки i -го самосвала j -м экскаватором;

t_{r_i} – продолжительность рейса i -го самосвала (включая простои в ожидании погрузки);

$\sum_{i=1}^{N_s} t_{pr}^s, \sum_{i=1}^{N_e} t_{pr}^e$ – простои самосвалов и экскаваторов в течение рабочей смены (суток) соответственно.

Величины $t_{p_{ij}}^e$ и t_{r_i} могут быть определены аналитическим путем или приняты по

фактическим данным предприятия. И если t_{ij}^e аналитически можно определить достаточно точно, то время рейса самосвала t_{r_i} – затруднительно. Поэтому во избежание получения некорректных результатов желательно использовать фактические значения. На некоторых предприятиях (в ОАО УК «Кузбассразрезуголь» это разрезы «Кедровский» и «Талдинский») на самосвалах установлена система управления и учета работы карьерного автотранспорта, позволяющая записывать время выполнения всех операций с точностью до секунды. К аналитическим расчетам или хронометражу следует прибегать, если на самосвалах указанная система не установлена.

Суммарные простои самосвалов $\sum_{i=1}^{N_s} t_{pr}^e$ и экскаваторов $\sum_{i=1}^{N_e} t_{pr}^e$ являются сугубо стохастическими величинами, поэтому аналитическое их определение невозможно. Они должны приниматься по данным предприятия.

Сводный отчет о работе ЭАК разреза «Кедровский» в летний период (01.08.2018) приведен в таблице.

Значение функционального критерия λ , рассчитанное по данным таблицы, составляет 0,597, то есть находится достаточно далеко от идеала (1,0). Оптимизация работы ЭАК позволит сократить этот разрыв.

Заключение

Отличительной особенностью функционального критерия для комплекса машин (ЭАК) является обеспечение рационального взаимодействия составляющих его карьерных экскаваторов и самосвалов. Экскаваторы как ведущие машины комплекса должны обеспечивать возможно более высокую производительность ЭАК, задача самосвалов – обеспечить достижение этой производительности, то есть работа парков экскаваторов и самосвалов должна быть максимально сбалансирована.

Степень сбалансированности суммарной производительности экскаваторного парка на конкретном предприятии при помощи необходимого для этого парка самосвалов может быть оценена путем сопоставления интенсивности поступления самосвалов под погрузку и интенсивности обслуживания их экскаваторами.

В случае однородности парков экскаваторов и самосвалов определение функционального критерия не представляет затруднений. На практике, однако, повсеместно применяются смешанные парки техники, что осложняет определение функционального критерия из-за необходимости сбора большого количества статистических материалов, обработки имеющихся данных, проведения хронометражных наблюдений, вычислительных процедур для получения достоверных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов, Ю.Е. Оптимальное проектирование карьерных горных машин. – М.: Инновационное машиностроение, 2015. – 351 с.
2. Буянкин, А.В. Комплексная оценка и прогнозирование показателей качества эксплуатации карьерных автосамосвалов : дис. ... канд. техн. наук. – КузГТУ, Кемерово, 2004.
3. Басманов, С.В. Оптимизация параметров карьерных автосамосвалов для повышения их технического уровня : дис. ... канд. техн. наук. – КузГТУ, Кемерово, 2012.
4. Зыков, П.А. Повышение технического уровня карьерных одноковшовых гидравлических экскаваторов на стадии проектирования : дис. ... канд. техн. наук. – КузГТУ, Кемерово, 2013.
5. Ta, C. A stochastic optimization approach to mine truck allocation / C. Ta, J. Kresta, J. Forbes, H. Marquez // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 2005. – Vol. 19, №3. – P. 162–175.
6. Krause, A. Modelling open pit shovel-truck systems using the machine repair model / A. Krause, C. Musingwini // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – Aug 2007. – Vol. 107. – P. 469–476.
7. Ercelebi, S. Optimization of shovel-truck system for surface mining / S. Ercelebi, A. Bascetin // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – Jul 2009. – Vol. 109. – P. 433–439.
8. May, M.A. Applications of queuing theory for open-pit truck-shovel haulage systems: MSc thesis. – Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2012.
9. Burt, C. Equipment selection for surface mining: a review / C. Burt, L. Caccetta // Interfaces. – 2014. – Vol. 44, №2. – P. 143–162.

10. Dindarloo, S. A stochastic simulation framework for truck and shovel selection and sizing in open pit mines / S. Dindarloo, M. Osanloo, S. Frimpong // *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. – Mar 2015. – Vol. 115. – P. 209–219.
11. Воронов, А.Ю. Оптимизация показателей эксплуатационной производительности экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов : дис. ... канд. техн. наук. – КузГТУ, Кемерово, 2015.
12. Burt, C. Match factor for heterogeneous truck and loader fleets / C. Burt, L. Caccetta // *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. – 2007. – 21, № 4. – P. 262–270.
13. Burt, C. Match factor for heterogeneous truck and loader fleets (corrigendum) / C. Burt, L. Caccetta // *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. – 2008. – 22, № 1. – P. 84–85.
14. Burt, C. An optimisation approach to materials handling in surface mines: PhD thesis. – Curtin University of Technology, Australia, 2008.
15. Burt, C. Equipment selection with heterogeneous fleets for multiple-period schedules / C. Burt, L. Caccetta, P. Welgama, L. Fouche // *Journal of the Operational Research Society*. – 2011. – Vol. 62, №8. – P. 1498–1509.
16. Nel, S. Improving truck-shovel matching / S. Nel, M. Kizil, P. Knights // *35th APCOM Symposium, Wollongong NSW*. – 2011. – P. 381–392.
17. 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.

REFERENCES

1. Voronov Y.E. Optimalnoe proektirovanie karjernyh gornyh mashin [Optimum design of open-pit mining machines]. Moscow: Innovative engineering. 2015. 351 p. (rus)
2. Bujankin A.V. Kompleksnaja otsenka i prognozirovanie pokazatelej kachestva ekspluatatsii kariernyh avtosamosvalov [Comprehensive assessment and prediction of operation quality indicators for mining dump trucks]. PhD thesis. Kemerovo: KuzSTU, 2004. (rus)
3. Basmanov S.V. Optimizatsia parametrov kariernyh avtosamosvalov dlja povyshenija ih tehnicheskogo urovnja [Optimization of mining dump truck parameters to increase their technical level]. PhD thesis. Kemerovo: KuzSTU, 2012. (rus)
4. Zykov P.A. Povyshenie tehnicheskogo urovnja kariernyh odnokovshovyh gidravlicheskih ekskavatorov na stadii proektirovanija [Improving the technical level of mining hydraulic shovels at the design stage]. PhD thesis. Kemerovo: KuzSTU, 2013. (rus)
5. Ta C. A stochastic optimization approach to mine truck allocation / C. Ta, J. Kresta, J. Forbes, H. Marquez // *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. 2005. Vol. 19, №3. P. 162–175.
6. Krause A. Modelling open pit shovel-truck systems using the machine repair model / A. Krause, C. Musingwini // *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Aug 2007. Vol. 107. P. 469–476.
7. Ercelebi S. Optimization of shovel-truck system for surface mining / S. Ercelebi, A. Bascetin // *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Jul 2009. Vol. 109. P. 433–439.
8. May M.A. Applications of queuing theory for open-pit truck-shovel haulage systems. MSc thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University, USA. 2012.
9. Burt C. Equipment selection for surface mining: a review / C. Burt, L. Caccetta // *Interfaces*. 2014. Vol. 44, №2. P. 143–162.
10. Dindarloo S. A stochastic simulation framework for truck and shovel selection and sizing in open pit mines / S. Dindarloo, M. Osanloo, S. Frimpong // *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Mar 2015. Vol. 115. P. 209–219.
11. Voronov A.Y. Optimizatsija pokazatelei ekspluatatsionnoi proizvoditelnosti ekskavatorno-avtomobilnyh kompleksov razrezov [Optimization of performance indicators of the shovel-truck systems at open-pit mines]. PhD thesis. Kemerovo: KuzSTU, 2015. (rus)
12. Burt C. Match factor for heterogeneous truck and loader fleets. *International Journal of Surface Mining*,

Reclamation and Environment / C. Burt, L. Caccetta // 2007. 21, № 4. P. 262–270.

13. Burt C. Match factor for heterogeneous truck and loader fleets (corregendum) / C. Burt, L. Caccetta // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 2008. 22, № 1. P. 84–85.

14. Burt C. An optimisation approach to materials handling in surface mines. PhD thesis. Curtin University of Technology, Australia. 2008.

15. Burt C. Equipment selection with heterogeneous fleets for multiple-period schedules / C. Burt, L. Caccetta, P. Welgama, L. Fouche // Journal of the Operational Research Society. 2011. Vol. 62, №8. P. 1498–1509.

16. Nel S. Improving truck-shovel matching / S. Nel, M. Kizil, P. Knights // 35th APCOM Symposium, Wollongong NSW. 2011. P. 381–392.

17. 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.

Поступило в редакцию 22.04.2019

Received 22 April 2019