

УДК 622.23.05

Воронов Антон Юрьевич, к.т.н.
(АО УК «Кузбассразрезуголь», г. Кемерово);
Хорешок Алексей Алексеевич, профессор, д.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово);
Воронов Юрий Евгеньевич, профессор, д.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово);
Воронов Артем Юрьевич, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово);
Anton Y. Voronov, candidate of engineering sciences,
(JSC «Kuzbassrazrezugol Coal Company», Kemerovo);
Alexey A. Khoreshok, professor, doctor of engineering sciences
(KuzSTU, Kemerovo);
Yuri Y. Voronov, professor, doctor of engineering sciences
(KuzSTU, Kemerovo);
Artyom Y. Voronov, docent, candidate of engineering sciences
(KuzSTU, Kemerovo)

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ РАЗРЕЗОВ****IMPROVING THE QUALITY OF SHOVEL-TRUCK SYSTEM
OPERATION AT OPEN-PIT COAL MINES**

***Аннотация.** Вскрышные работы на разрезах выполняются экскаваторно-автомобильными комплексами (ЭАК). Одной из основных проблем ЭАК является невысокий уровень качества их функционирования. Увеличение единичной мощности самосвалов и экскаваторов, не сопровождается пропорциональным ростом их производительности и показателей использования. Это приводит лишь к количественному росту экскаваторного и автотранспортного парков без существенного улучшения качества их работы. Причиной этого является недостаточный учёт влияния совместной работы экскаваторов и самосвалов на эффективность работы ЭАК. В связи с этим целью исследования является повышение качества работы ЭАК за счет оптимизации их параметров. В исследовании использовались: научное обобщение, методы интегральной оценки качества, оптимизационное моделирование и линейное программирование, методы статистической обработки данных, анализа и синтеза. В результате разработан новый подход к оптимизации параметров ЭАК и формированию оптимальных парков погрузочно-транспортной техники в процессах проектирования и совершенствования ЭАК, и комплекс методик для их реализации.*

Abstract. *Overburden operations in open-pit coal mines are carried out by truck-shovel systems (STSs). One of the main problems of STSs is the low level of its operation quality. An increase in the unit capacity of mining trucks and shovels is not accompanied by a proportional increase in its productivity and utilization rates. This only leads to a quantitative growth of shovel and truck fleets without a significant improvement in its operation quality. The reason for this is the insufficient consideration of the impact of the joint operation of shovels and trucks on the STS efficiency. In this regard, the purpose of the study is to improve the STS operation quality by optimizing its parameters. The study used: scientific generalization, methods of integral quality assessment, optimization modeling and linear programming, methods of statistical data processing, analysis and synthesis. As a result, a new approach has been developed to optimize the STS parameters and to form the optimal fleets of loading and transport equipment during designing and improving the STS, as well as a set of methods for its implementation.*

Большие объёмы горной массы на разрезах, разрабатываемой ЭАК, обуславливают постоянное ведение широкомасштабных работ по совершенствованию средств карьерной экскаваторно-автомобильной техники и организации их работы. Увеличение единичной мощности погрузочно-транспортной техники не сопровождается пропорциональным ростом его производительности и улучшением качественных показателей использования. Несогласованность совместной работы экскаваторов и самосвалов в составе ЭАК оставляет качество функционирования ЭАК на невысоком уровне. Связано это с недостаточной разработанностью теории оптимального проектирования горных машин и комплексов (в том числе и ЭАК).

Для оценки качества работы ЭАК использована методика безэкспертной оценки, позволяющая оценивать функционально-однородные горные машины различной сложности, типов и конструктивных исполнений, разработанная в Московском горном институте Г.И. Солодом.

Являющийся основой этой методики функциональный критерий (ФК), исходя из системного подхода и специфики работы ЭАК, представляется как отношение интенсивности поступления самосвалов под погрузку к интенсивности обслуживания их экскаваторами. Он в наибольшей степени характеризует согласованность их совместной работы, и определяется по формуле:

$$\lambda = \frac{N_c}{\frac{N_3}{t_{\Pi}^3} \cdot t_p \cdot k_{\text{ЭАК}}},$$

где N_3 , N_c – общая численность экскаваторного и автотранспортного парков ЭАК; t_{Π}^3 – время полной загрузки самосвала экскаватором, мин;

t_p – продолжительность рейса самосвала, мин; $k_{\text{ЭАК}}$ – коэффициент эксплуатационной производительности ЭАК, представляющий собой отношение чистого времени работы экскаваторов и самосвалов к продолжительности смены с учётом всех регламентированных и неплановых простоев; $k_{\text{ЭАК}} = 1 - \frac{t_{\text{пр}\Sigma}^{\text{э}} + t_{\text{пр}\Sigma}^{\text{с}}}{T_{\text{см}}(N_{\text{э}} + N_{\text{с}})}$, где $t_{\text{пр}\Sigma}^{\text{э}}$, $t_{\text{пр}\Sigma}^{\text{с}}$ – суммарные простои $N_{\text{э}}$ экскаваторов и $N_{\text{с}}$ самосвалов в течение рабочей смены $T_{\text{см}}$ соответственно, мин [1, 2].

Следующим важным вопросом оценки является обоснованный выбор необходимой и достаточной номенклатуры показателей качества работы ЭАК. Эта номенклатура устанавливается в результате детального анализа технологического процесса работы ЭАК с проверкой, прежде всего, на подчинённость цели оценки качества. Цель оценки качества определена в виде ФК, следовательно, в номенклатуру единичных показателей качества должны входить показатели, так или иначе влияющие на ФК. В результате сформирован комплекс из 7 единичных показателей качества (рис. 1) [3]. Они на рисунке выделены жирным шрифтом.

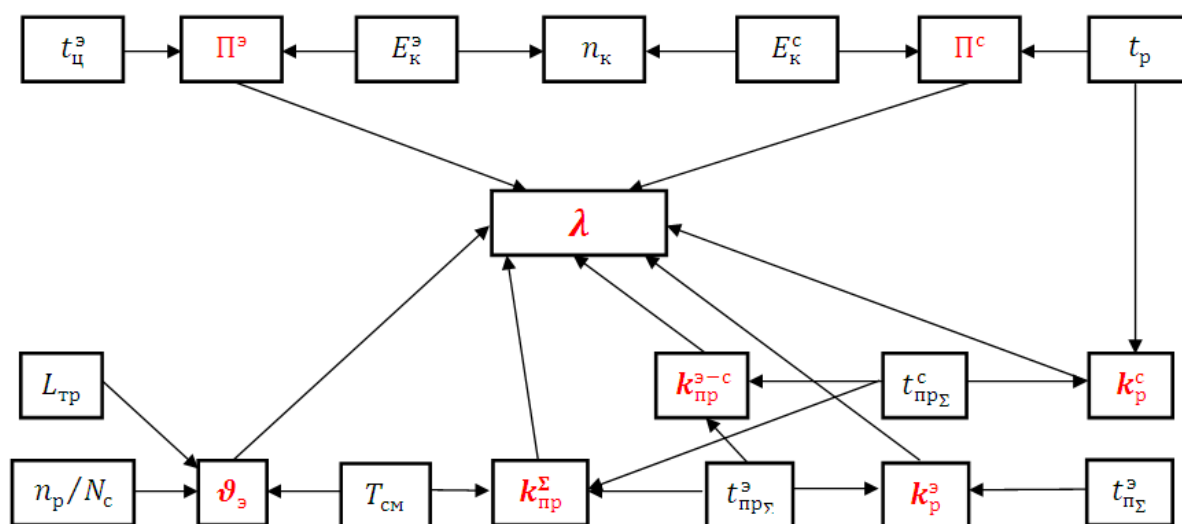


Рис. 1. Комплекс показателей качества работы ЭАК разрезов

$\Pi^{\text{э}}$ – показатель производительности экскаваторного парка; $\Pi^{\text{с}}$ – показатель производительности автотранспортного парка; $\theta_{\text{э}}$ – эксплуатационная скорость самосвалов; $k_{\text{пр}}^{\Sigma}$ – доля простоев погрузочно-транспортной техники в продолжительности рабочей смены; $k_{\text{пр}}^{\text{э-с}}$ – соотношение простоев экскаваторов и самосвалов; $k_{\text{п}}^{\text{э}}$ – уровень производительного использования экскаваторного парка; $k_{\text{п}}^{\text{с}}$ – уровень производительного использования автотранспортного парка; $t_{\text{ц}}^{\text{э}}$ – время цикла экскаватора; $E_{\text{к}}^{\text{э}}$ – вместимость ковша экскаватора; $E_{\text{к}}^{\text{с}}$ – вместимость кузова самосвала; $n_{\text{к}}$ – количество загружаемых в кузов самосвала ковшей экскаватора; $L_{\text{тр}}$ – расстояние транспортирования; $n_{\text{п}}/N_{\text{с}}$ – количество рейсов, выполненных каждым самосвалом в течение смены; $n_{\text{п}}$ – количество рейсов, выполненных автотранспортным парком в течение смены; $t_{\text{п}\Sigma}^{\text{э}}$ – суммарное время загрузки самосвалов экскаваторами в течение смены

По выбранным показателям произведена сравнительная оценка качества работы ЭАК разрезов, входящих в состав УК «Кузбассразрезуголь» (КРУ) и КРУ в целом, на основании сводных отчётов об их работе. Диаграмма обобщённого показателя качества работы ЭАК приведена на рис. 2.

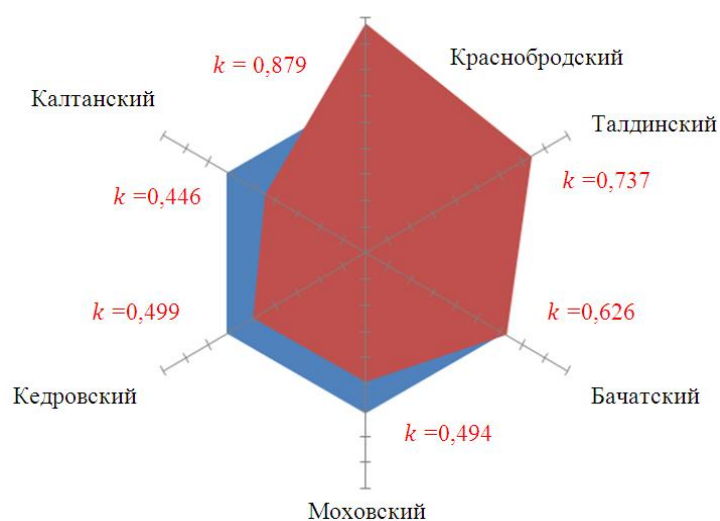


Рис. 2. Диаграммы комплексного показателя уровня качества работы ЭАК разрезов (синим цветом – в целом по КРУ; $k^{KRU} = 0,614$)

Общий анализ показывает, что у трёх («Краснобродский», «Талдинский» и «Бачатский») из шести разрезов он выше значения 0,614, как общего по КРУ, и у трёх («Моховский», «Кедровский» и «Калтанский») – довольно сильно отстаёт. Это свидетельствует об общем невысоком качестве работы ЭАК на разрезах.

Установлено, что преобладающее влияние на

показатели качества оказывает ФК, который определяется соотношением численности автотранспортного и экскаваторного парков в составе ЭАК разреза ($N_c/N_{\text{э}}$), их простоями ($k_{\text{ЭАК}}$), временем погрузки ($t_{\text{п}}^{\text{э}}$) и продолжительностью рейса самосвалов ($t_{\text{р}}$). Одни из них надо увеличивать, другие – уменьшать, а вот какими конкретно должны быть значения этих параметров, при том, что качество работы ЭАК должно быть наивысшим, установить при оценке качества не представляется возможным. Их можно определить только в результате оптимизации. Таким образом, повышение качества работы ЭАК разрезов может быть достигнуто за счёт оптимального проектирования ЭАК, которое позволяет определить и оптимально сбалансировать указанные параметры ЭАК [4].

Основой оптимального проектирования является системный подход, позволяющий удерживать объект как целое, когда проектируются его отдельные элементы. Системный подход при определении показателей функционирования ЭАК заключается в том, что они, во-первых, должны соотноситься друг с другом оптимальным образом, и, во-вторых, получаемые на их основе выходные эксплуатационные показатели – отвечать требуемым значениям (рис. 3).

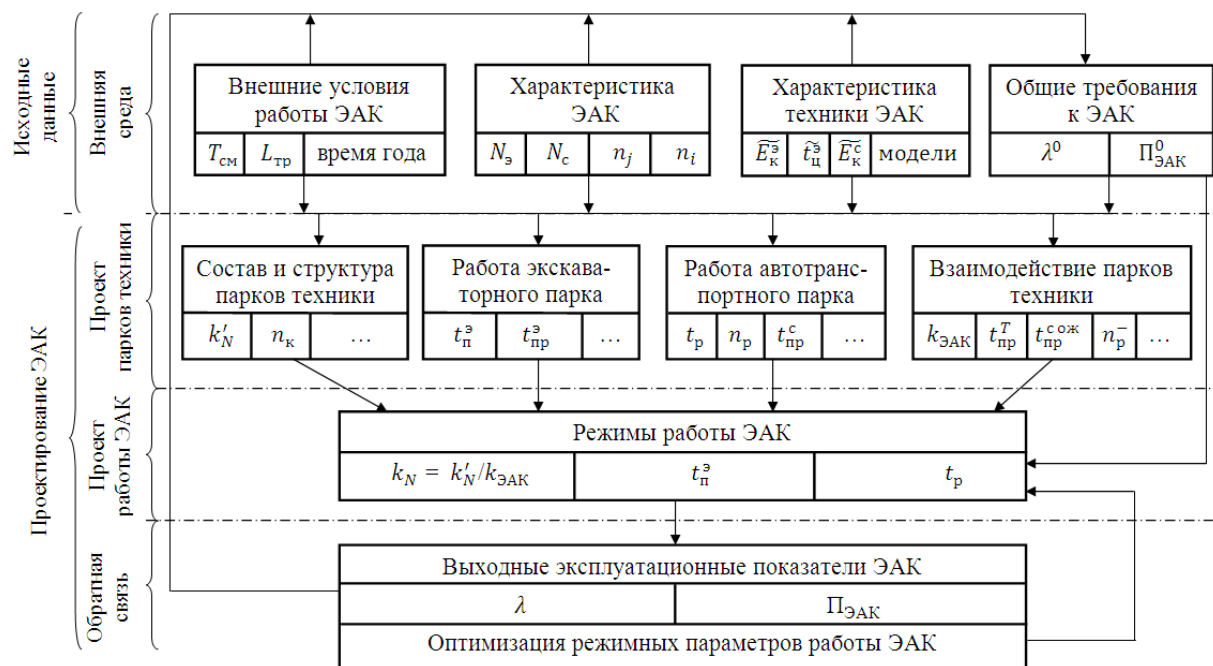


Рис. 3. Структурная схема проектирования карьерного ЭАК и его оптимизации

Карьерный ЭАК как система характеризуется структурой и параметрами. Структура комплекса определяет его составные части и связи между ними и должна обеспечивать оптимальное функционирование, для чего характеризующие работу ЭАК параметры должны быть оптимизированы. Алгоритм оптимизации представлен на рис. 3.

Таким образом, ставится задача установления степени влияния каждого из этих параметров на комплексный показатель качества работы ЭАК, выбранный в качестве критерия оптимизации, и формирования на этой основе принятой линейной модели целевой функции. При решении задачи оптимизации параметров работы ЭАК действуют следующие ограничения.

1. Ограничения по соответствию фактических значений эксплуатационных показателей λ , $\Pi_{\text{ЭАК}}$ требуемым значениям λ^0 , $\Pi_{\text{ЭАК}}^0$ (рис. 3).

2. Ограничение по взаимосвязи оптимизируемых параметров $t_{\text{п}}^3$ и $t_{\text{п}}$. Уравнение взаимосвязи имеет вид: $t_{\text{п}}^3 = 4,978 - 0,0619t_{\text{п}}$ ($r = 0,792$; $F = 211,67 > F_{\text{кр}} = 6,94$; $t = 2,597 < t_{\text{кр}} = 2,776$). Данное ограничение включено ввиду того, что надёжной связи между этими параметрами нет, так как не подтверждена надёжность коэффициента корреляции по t -критерию Стьюдента.

3. Граничные условия, отражающие диапазон изменения оптимизируемых параметров. Анализ показывает, что для всех них может быть задано только нижнее граничное условие – и это условие их неотрицательности, то есть $k_N \geq 0$; $t_{\text{п}}^3 \geq 0$; $t_{\text{п}} \geq 0$.

В результате получена математическая модель оптимизации параметров ЭАК, представляющая собой задачу линейного программирования.

$$k = -0,268 + 0,209k_N + 0,397t_{\Pi}^3 - 0,0415t_p \rightarrow \max;$$

$$0,130k_N + 0,230t_{\Pi}^3 - 0,0250t_p \geq 0,917;$$

$$0,130k_N + 0,230t_{\Pi}^3 - 0,0250t_p \leq 1,083;$$

$$t_{\Pi}^3 + 0,0619t_p \geq 4,822;$$

$$t_{\Pi}^3 + 0,0619t_p \leq 5,134;$$

$$k_N \geq 5,124;$$

$$k_N \leq 6,653;$$

$$k_N \geq 0; t_{\Pi}^3 \geq 0; t_p \geq 0.$$

В результате исследования модели будут получены оптимальные значения коэффициента эффективного состава автотранспортного и экскаваторного парков ЭАК k_N^* , времени загрузки самосвалов экскаваторами t_{Π}^* , продолжительности рейса самосвала t_p^* , а также функционального критерия λ^* и комплексного показателя качества k^* . Из этих значений можно синтезировать конкретные оптимальные параметры ЭАК, а также сформулировать принципы формирования по ним оптимальных парков техники, которые и рекомендовать для совершенствования или проектирования ЭАК разрезов.

Данная методика разработана применительно к условиям разрезов КРУ, однако может быть использована для оптимизации работы ЭАК и для других внешних условий, которые могут задаваться заказчиками. Она предлагает качественно новый подход к формированию основных режимов работы ЭАК с оптимальными параметрами.

Установлено, что оптимальный уровень качества работы ЭАК разрезов Кузбасса обеспечивается достижением значений параметров в следующих пределах: количество самосвалов на один экскаватор – $4,9 \div 6,3$; время загрузки самосвала экскаватором – $3,2 \div 3,9$ мин; продолжительность рейса самосвала – $17,6 \div 28,8$ мин. Изменение параметров в указанных пределах не повлияет на структуру оптимального решения. Изменяться может только их соотношение, величина функционального критерия λ^* и комплексный показатель качества работы ЭАК k^* . Это означает, что в указанных пределах при необходимости оптимальные значения можно варьировать, но не произвольно, а с учётом существующих взаимосвязей между ними. Указанные вариационные расчёты представляют довольно простую задачу, что позволяет достаточно быстро и легко оценить принимаемые решения. Значения оптимизируемых параметров, выходящие за пределы указанных диапазонов, не являются оптимальными, поскольку не отвечают существующим взаимосвязям параметров работы ЭАК, то есть принципу системности.

Оптимальным решением при этом будет следующее сочетание значений оптимизируемых параметров, функционального критерия и критерия оптимизации:

$$k_N^* = 6,60; t_{\Pi}^* = 3,6 \text{ мин}; t_p^* = 24,5 \text{ мин}; \lambda^* = 0,983; k^* = 1,355.$$

Таким образом, оптимальное согласование параметров повышает уровень качества работы ЭАК k по сравнению с лучшим из ЭАК действующего разреза «Краснобродский» с 0,879 до 1,355 (на 33%), и на 53% – по сравнению с уровнем качества работы ЭАК по КРУ в целом $k = 0,614$. Функциональный критерий при этом составляет $\lambda = 0,983$ и близок к оптимальному значению $\lambda = 1$ [5, 6].

Порядок формирования смешанных парков техники ЭАК с оптимальными параметрами показан на примере разреза-аналога «Талдинский», как наиболее близкого к оптимальному по численному составу экскаваторного и автотранспортного парков.

Разрез «Талдинский» относится к сложным для проектирования ЭАК предприятиям, поскольку вскрышные работы ведутся не на одном, а на трёх полях – Талдинском, Таёжном и Ерунаковском. При этом расстояния транспортирования различаются не только для каждого поля, но и для каждого типа самосвалов. Планируются также требуемые объёмы погрузки и перевозок для самосвалов каждого типоразмера на каждом поле.

Предполагается, что продолжительность рейса самосвалов не меняется. Для получения сопоставимых результатов суточные объёмы погрузки и перевозок также оставлены без изменения. Требуемая численность парков техники – 13 экскаваторов и 83 самосвала по оптимальному варианту, вместо 14 экскаваторов и 91 самосвала – по базовому, то есть имеется возможность сократить один экскаватор и 8 самосвалов. Предложен следующий вариант корректировки парков: удаляется один самосвал БелАЗ-75131 с Таёжного поля и 7 таких же самосвалов с Ерунаковского поля. Подлежащий сокращению один экскаватор удаляется с Таёжного поля, но вместо него с Ерунаковского поля перебрасывается экскаватор меньшего типа-размера.

В результате установлено, что оптимизация режимных параметров работы позволяет снизить численность экскаваторного и автотранспортного парков (или увеличить производительность ЭАК), на 9% при сохранении оптимальной продолжительности рабочей смены.

Обобщённый показатель качества работы оптимального ЭАК для условий разреза-аналога «Талдинский» составил $k^* = 1,100$ вместо фактического $k = 0,737$ (превышение 33%). Функциональный критерий при этом составляют $\lambda^* = 0,793$, что превышает аналогичный фактический показатель для разреза «Талдинский» ($\lambda = 0,704$) на 11,2%. Значение функционального критерия в данном случае хотя и не попадает в диапазон оптимальных значений ($1 \geq \lambda^0 \geq 0,9$), однако всё равно лучше фактического.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Burt, C. N. Match factor for heterogeneous truck and loader fleets / C. N. Burt, L. Caccetta // *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*. – 2007. – Vol. 21, № 4. – P. 262-270.
2. Voronov, Yu. Quality criterion of the loading and transport system operation at open-pit mines / Yu. Voronov, An. Voronov, Ar. Voronov // *The IVth International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment)*. – Kemerovo, Russian Federation, November 20-22, 2019. – *E3S Web of Conferences*, Volume 105. – P. 01048.
3. Воронов, Ан. Ю. Обоснование показателей качества функционирования карьерного экскаваторно-автомобильного комплекса / Ан. Ю. Воронов, А. А. Хорешок, Ю. Е. Воронов, В. Л. Жданов, Ар. Ю. Воронов // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2019. – № 4(144). – С. 3-9.
4. Воронов, Ан. Ю. Оценка качества работы экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов Кузбасса / Ан. Ю. Воронов, А. А. Хорешок, Ю. Е. Воронов, А. В. Буянкин, Ар. Ю. Воронов // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2020. – № 2(148). – С. 19-26.
5. Воронов, Ан. Ю. Математическая модель оптимизации работы карьерных экскаваторно-автомобильных комплексов // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2020. – № 2(148). – С. 13-18.
6. Воронов, Ан. Ю. Оптимизация показателей функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов разрезов по критерию качества / Ан. Ю. Воронов, А. А. Хорешок, Ю. Е. Воронов, В. Г. Ромашко, Ар. Ю. Воронов // *Горное оборудование и электромеханика*. – 2020. – № 6(152). – С. 19-24.