

Воронов Антон Юрьевич

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

E-mail: a.voronov@kru.ru

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ КАРЬЕРНЫХ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Аннотация: *Актуальность работы.* Погрузочно-транспортные работы на карьерах выполняются преимущественно мощными экскаваторно-автомобильными комплексами (ЭАК). Одной из основных проблем ЭАК является достаточно низкий уровень качества их работы. Мощным средством повышения качества функционирования ЭАК является его оптимизация, основанная на системном подходе, согласно которому работа составных элементов комплекса изучается путём анализа функционирования ЭАК в целом. Применительно к оптимизации показателей функционирования ЭАК системный подход заключается в оптимальном согласовании их между собой при условии соответствия требованиям, предъявляемым к функционированию ЭАК. Первым этапом оптимизации работы ЭАК является разработка её математической модели.

Цель работы – разработка математической модели оптимизации работы карьерных ЭАК.

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

Результаты. Оптимизация показателей работы ЭАК осуществляется по её математической модели, включающей целевую функцию и ограничения, представляемые в виде линейных уравнений регрессионного анализа, непосредственно связывающих соответствующие выходные эксплуатационные показатели с оптимизируемыми параметрами. Это позволяет использовать для решения математический аппарат линейного программирования. В качестве критерия оптимизации предложено использовать обобщённые оценки, а в качестве оптимизируемых параметров – единичные показатели качества функционирования ЭАК. Это упрощает оптимизацию и повышает её точность, а также обеспечивает наилучшую степень согласованности оптимизируемых параметров между собой и внешней средой.

Ключевые слова: открытые горные работы; экскаваторно-автомобильный комплекс; математическая модель оптимизации работы ЭАК.

Информация о статье: принята 12 февраля 2020 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-2-13-18

В настоящее время существует достаточно большое количество моделей, исследующих ЭАК карьеров [1–7]. Однако нет достаточных методических и нормативных материалов, регламентирующих такое важнейшее направление повышения качества объектов, как их оптимальное проектирование. К настоящему времени вопросам оптимального проектирования станков вращательного бурения, одноковшовых гидравлических экскаваторов, а также автотранспортной техники для разрезов посвящено несколько работ [8]. Все они рассматривают отдельные машины. Применительно к карьерным экскаваторно-автомобильным комплексам (ЭАК) разработок нет. Тем не менее, основные методические подходы, приведённые в работе [5], могут быть использованы для решения задачи оптимизации работы ЭАК как комплекса машин.

Концептуальной основой оптимального проектирования является системный подход, который при назначении показателей работы ЭАК заключается в том, что они, во-первых, должны соотноситься друг с другом оптимальным образом,

во-вторых, получаемые на их основе технико-эксплуатационные показатели должны отвечать рекомендованным значениям [9].

ЭАК как система характеризуется структурой и показателями работы. Структура ЭАК определяет её составные части и связи между ними и должна обеспечивать оптимальное его функционирование, для чего характеризующие ЭАК показатели должны быть оптимизированы (рис. 1). В качестве критерия оптимизации целесообразно использовать обобщённые оценки качества, а в качестве оптимизируемых параметров – его единичные показатели. Это позволяет упростить оптимизацию, так как задача при этом может быть разделена на две более простые: вначале оптимизировать единичные показатели качества, то есть решить задачу с меньшим числом неизвестных, а затем разделить эти оптимальные единичные показатели на более подробные [10]. Для расчёта единичных и обобщённых показателей качества работы ЭАК целесообразно использовать соответствующие зависимости широко применяемой

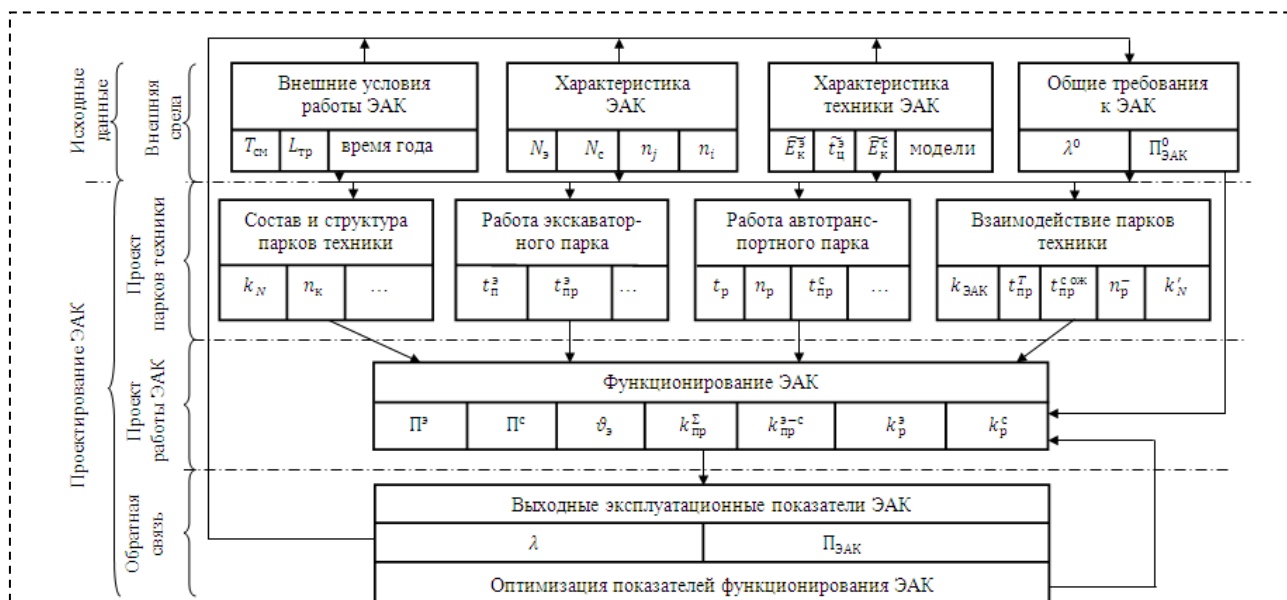


Рис. 1 – Структурная схема проектирования карьерного ЭАК и оптимизации его функционирования
 Fig. 1 – A structural diagram of the design of a mining STS and the optimization of its operation

$T_{см}$ – продолжительность смены; $L_{тр}$ – расстояние транспортирования; $N_э, N_с, n_j, n_i$ – количество экскаваторов, самосвалов и их типоразмеров; $\bar{E}_к^э, \bar{t}_ц^э, \bar{E}_к^с$ – показатели технической характеристики техники; λ – функциональный критерий; $\Pi_{ЭАК}$ – производительность ЭАК; k'_N, k_N – коэффициент состава и эффективного состава ЭАК; n_k – количество ковшей, загружаемых в кузов; $t_n^э$ – время загрузки самосвала; t_p – время рейса; n_p – количество выполненных рейсов; $t_{пр}^э, t_{пр}^с, t_{пр}^c$ – простои экскаваторов, самосвалов и техники в целом; $t_{пр}^{с.ож}$ – простои самосвала в ожидании погрузки; n_p^- – количество рейсов, потерянных в ожидании; $k_{ЭАК}$ – коэффициент эксплуатационной производительности ЭАК; $\Pi^э, \Pi^с$ – показатели производительности парков экскаваторов и самосвалов; $\vartheta_э$ – эксплуатационная скорость самосвалов; $k_{пр}^э$ – доля простоев в продолжительности смены; $k_{пр}^{э-с}$ – соотношение простоев экскаваторов и самосвалов; $k_p^э, k_p^с$ – показатели производительного использования экскаваторов и самосвалов

в настоящее время методики безэкспертной оценки качества горных машин [11].

Модели целевой функции и ограничений математической модели оптимизации (ММО) формируются в результате анализа функционирования ЭАК как системы и представляются в виде уравнений регрессионного анализа, непосредственно связывающих соответствующие выходные эксплуатационные показатели с оптимизируемыми параметрами.

Основными выходными эксплуатационными показателями для ЭАК являются функциональный критерий λ , а также производительность ЭАК $\Pi_{ЭАК}$, определяющие и все другие его характеристики.

Функциональный критерий качества функционирования ЭАК представляет собой соотношение интенсивностей работы автотранспортного и экскаваторного парков ЭАК [12–14]. Он определяется по следующей формуле [13]:

$$\lambda = \frac{N_с}{\frac{N_э}{t_n^э} \cdot t_p \cdot k_{ЭАК}} \quad (1)$$

где $N_с/N_э = k'_N$ – соотношение численности автотранспортного $N_с$ и экскаваторного $N_э$ парков (коэффициент состава ЭАК); $t_n^э, t_p$ – средневзвешенные по всем разрезам значения времени загрузки самосвалов экскаваторами и временем рейса самосвалов, мин; $k_{ЭАК}$ – коэффициент

эксплуатационной производительности ЭАК, отражающий влияние простоев экскаваторного и автотранспортного парков [12].

$$k_{ЭАК} = 1 - \frac{\sum_1^{N_э} t_{пр}^э + \sum_1^{N_с} t_{пр}^с}{T_{см}(N_э + N_с)}, \quad (2)$$

где $\sum_1^{N_э} t_{пр}^э, \sum_1^{N_с} t_{пр}^с$ – суммарные простои $N_э$ экскаваторов и $N_с$ самосвалов в течение рабочей смены соответственно, мин; $T_{см}$ – продолжительность смены, мин.

Сменная производительность ЭАК определяется возможностями экскаваторного парка и может быть представлена в виде ($m^3/смену$):

$$\Pi_{ЭАК} = \Pi^э \cdot N_э \cdot T_{см} \cdot k_{ЭАК}, \quad (3)$$

где $\Pi^э$ – показатель производительности экскаваторного парка, $m^3/мин$ (входит в номенклатуру показателей качества функционирования ЭАК).

Входящая в формулы для определения функционального критерия (1) и производительности экскаваторного парка (3) величина $N_э \cdot k_{ЭАК}$ представляет собой эффективное количество экскаваторов (работающих без простоев), являющихся ведущими машинами в составе ЭАК. Обозначив через

$$k_N = \frac{N_с}{N_э \cdot k_{ЭАК}} \quad (4)$$

коэффициент эффективного состава автотранспортного и экскаваторного парков ЭАК,

получим следующее выражение для функционального критерия:

$$\lambda = \frac{k_N \cdot t_p^3}{t_p} \quad (5)$$

Имея из формулы (4) $N_3 \cdot k_{\text{ЭАК}} = \frac{N_c}{k_N}$, и подставив это в зависимость (3), получим:

$$P_{\text{ЭАК}} = P^3 \cdot \frac{N_c}{k_N} \cdot T_{\text{см}}$$

Чтобы избежать необходимости сводить воедино разрезы с сильно различающимися по численности работающими ежесменно автотранспортными парками (по УК «Кузбассразрезуголь» от 28 до 93 самосвалов), целесообразно использовать удельную производительность ЭАК (в расчёте на 1 самосвал). Имеем

$$P_{\text{ЭАК}}^{\text{уд}} = \frac{P^3 \cdot T_{\text{см}}}{k_N} \quad (6)$$

Зависимость продолжительности смены $T_{\text{см}}$ от оптимизируемых параметров получим из следующих соображений. Суммарное время простоев техники (экскаваторов и самосвалов) $t_{\text{пр}}^T = \sum_1^{N_3} t_{\text{пр}}^a + \sum_1^{N_c} t_{\text{пр}}^c$ представляет собой суммарную продолжительность рабочих смен всех самосвалов за вычетом суммарного времени рейсов всех самосвалов в течение смены, то есть

$$t_{\text{пр}}^T = T_{\text{см}} \cdot N_c - t_p \cdot n_p \quad (7)$$

где n_p – количество выполненных в течение рабочей смены рейсов.

С другой стороны, из (2) имеем:

$$t_{\text{пр}}^T = T_{\text{см}}(N_c + N_3)(1 - k_{\text{ЭАК}}) \quad (8)$$

Из равенства зависимостей (7) и (8), а также с учётом того, что

$$k_{\text{ЭАК}} = \frac{N_c}{N_3 \cdot k_N},$$

после преобразований получим:

$$T_{\text{см}} = \frac{t_p \cdot n_p / N_c}{\frac{k_N + 1}{k_N} + \frac{1}{k_N}} \quad (9)$$

Предполагаем наличие связи между количеством рейсов, выполненных каждым самосвалом в течение смены, n_p/N_c , и продолжительностью рейса t_p . Действительно, чем больше время рейса, тем меньшее количество рейсов самосвал за смену может выполнить. Расчёты подтвердили существование такой зависимости. Она получена в результате статистической обработки соответствующих данных для шести разрезов, входящих в УК «Кузбассразрезуголь», и имеет следующий вид: $n_p/N_c = 77,24 - 1,318t_p$, для которой коэффициент корреляции составляет $r = 0,914$; его надёжность подтверждена по критерию Стьюдента ($t = 4,514 > t_{\text{кр}} = 2,776$); значимость параметров регрессии подтверждена по критерию Фишера ($F = 219,48 > F_{\text{кр}} = 6,94$).

Связь между показателями k'_N и k_N в зависимости (9) установить не удаётся, поэтому зависимость между ними будем вычислять через разность $(k_N - k'_N)$ как средневзвешенное по разрезам значение, то есть $(k_N - k'_N) = \frac{\sum_1^m [(k_N - k'_N)_m \cdot n_{pm}]}{\sum_1^m n_{pm}}$.

Расчёты показали, что средневзвешенное значение величины $(k_N - k'_N)$ составляет 0,357, то есть $k'_N = k_N - 0,357$.

Подставляем эту величину и зависимость для n_p/N_c в выражение (9), и получаем зависимость продолжительности рабочей смены $T_{\text{см}}$ от двух переменных: времени рейса самосвала t_p и коэффициента эффективного состава парков k_N , причём числитель зависит только от t_p , а знаменатель – от k_N .

Обозначим числитель зависимости (9) через функцию F_t и попробуем её линеаризовать: $F_t = a + bt_p$. Линеаризации между функцией и аргументом в данном случае установить не удалось. Судя по значениям, функция F_t , при любых значениях t_p примерно постоянна, то есть $F_t = \text{Const}$. Определим это значение, как и в предыдущих случаях, как средневзвешенное по разрезам: $F_t = 1084,1$ мин.

Величину P^3 в зависимости для определения удельной производительности ЭАК $P_{\text{ЭАК}}^{\text{уд}}$ (6) также определим как средневзвешенное значение по разрезам: $P^3 = 44,21$ м³/мин.

Аналогично линеаризуем знаменатель зависимости (9): $F_k = k_N \left(\frac{k'_N + 1}{k_N} + \frac{1}{k_N} \right) = a + bk_N$. Указанная зависимость имеет вид: $F_k = 1,0155 - 0,527k_N$, для которой $r = 0,999$; $t = 44,4 > t_{\text{кр}} = 2,776$; $F = 1492762,48 > F_{\text{кр}} = 6,94$.

Подставив полученные значения в зависимость для $T_{\text{см}}$ (9), получим выражение для удельной сменной производительности ЭАК в зависимости от оптимизируемых показателей (тыс. м³/смену на 1 самосвал):

$$P_{\text{ЭАК}}^{\text{уд}} = \frac{58,27t_p(58,6 - t_p)}{1,0155 - 0,527k_N} \quad (10)$$

В зависимости для функционального критерия (5) предположим существование связи между временем загрузки самосвала экскаватором, t_p^3 , и временем рейса t_p . Предпосылкой для такого предположения может служить то, что время погрузки является частью времени рейса; неясно только, насколько эта связь сильна. Зависимость имеет вид – $t_p^3 = 4,978 - 0,0619t_p$, а статистические характеристики – $r = 0,792$; $t = 2,597 < t_{\text{кр}} = 2,776$; $F = 211,67 > F_{\text{кр}} = 6,94$.

Необходимая теснота связи между показателями t_p^3 и t_p по критерию Стьюдента не подтверждена, следовательно, они оба остаются в номенклатуре оптимизируемых параметров. А поскольку статистическая связь между ними всё-таки имеется, так как достоверность зависимости по критерию Фишера подтверждается, данную зависимость включаем в состав ограниченный.

Таким образом, получаем группу из трёх оптимизируемых параметров, один из которых (k_N) является относительным, два (t_p^3 и t_p) – абсолютными. Относительный параметр k_N охватывают четыре абсолютных: N_c и N_3 (количественный состав автотранспортного и экскаваторного парков

в ЭАК), $k_{\text{ЭАК}}$ (коэффициент эксплуатационной производительности ЭАК), который, в свою очередь, включает $t_{\text{пр}}^T$ (суммарные простои техники в течение смены) и $T_{\text{см}}$ (продолжительность рабочей смены).

Задача установления степени влияния каждого из оптимизируемых параметров на обобщённый показатель качества k , выбранный в качестве критерия оптимизации, и формирования на этой основе модели целевой функции относится к задачам аппроксимационного типа и решается с использованием теории планирования эксперимента. В результате её решения должна быть получена полиномиальная модель регрессионного анализа:

$$k = a_0 + a_1 k_N + a_2 t_n^3 + a_3 t_p, \quad (11)$$

отражающая влияние каждого из оптимизируемых параметров на критерий оптимизации. В выражении (11): k – обобщённый показатель качества (функция отклика); k_N , t_n^3 , t_p – оптимизируемые параметры (факторы); a_n – коэффициенты.

Полученная в результате регрессионная зависимость позволяет количественно оценить степень влияния каждого из оптимизируемых параметров на обобщённый показатель качества функционирования ЭАК.

При решении задачи оптимизации показателей качества функционирования ЭАК накладываются следующие ограничения.

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

Модели этих ограничений могут быть получены на основе регрессионных зависимостей, связывающих соответствующие выходные эксплуатационные показатели с оптимизируемыми параметрами:

$$\begin{cases} a_{10} + a_{11}k_N + a_{12}t_n^3 + a_{13}t_p \geq \lambda^0; \\ a_{20} + a_{21}k_N + a_{22}t_n^3 + a_{23}t_p \geq \Pi_{\text{ЭАК}}^0. \end{cases} \quad (12)$$

2. Ограничение по взаимосвязи оптимизируемых показателей t_n^3 и t_p . Уравнение взаимосвязи приведено выше.

Поскольку в зависимостях (12) выходные эксплуатационные показатели λ^0 и $\Pi_{\text{ЭАК}}^0$, а также уравнения взаимосвязи оптимизируемых показателей t_n^3 и t_p ($t_n^3 \div t_p$)⁰ не принимают определённых значений, а обладают разбросом, определяемым соответствующими значениями стандартных отклонений S_0^λ , $S_0^{\Pi_{\text{ЭАК}}}$ и S_0^t , ограничения (12) можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} |\lambda^0 - a_{10} - a_{11}k_N - a_{12}t_n^3 - a_{13}t_p| \leq S_0^\lambda; \\ |\Pi_{\text{ЭАК}}^0 - a_{20} - a_{21}k_N - a_{22}t_n^3 - a_{23}t_p| \leq S_0^{\Pi_{\text{ЭАК}}}; \\ |(t_n^3 \div t_p)^0 - a_{30} - a_{31}k_N - a_{32}t_n^3 - a_{33}t_p| \leq S_0^t. \end{cases}$$

Каждое из этих ограничений может быть разложено на два ограничения:

$$\begin{cases} a_{10} + a_{11}k_N + a_{12}t_n^3 + a_{13}t_p \geq \lambda^0 - S_0^\lambda; \\ a_{10} + a_{11}k_N + a_{12}t_n^3 + a_{13}t_p \leq \lambda^0 + S_0^\lambda; \\ a_{20} + a_{21}k_N + a_{22}t_n^3 + a_{23}t_p \geq \Pi_{\text{ЭАК}}^0 - S_0^{\Pi_{\text{ЭАК}}}; \\ a_{20} + a_{21}k_N + a_{22}t_n^3 + a_{23}t_p \leq \Pi_{\text{ЭАК}}^0 + S_0^{\Pi_{\text{ЭАК}}}; \\ a_{30} + a_{31}k_N + a_{32}t_n^3 + a_{33}t_p \geq (t_n^3 \div t_p)^0 - S_0^t; \\ a_{30} + a_{31}k_N + a_{32}t_n^3 + a_{33}t_p \leq (t_n^3 \div t_p)^0 + S_0^t. \end{cases} \quad (13)$$

Параметры моделей ограничений (13), как и модели целевой функции (11), устанавливаются в результате математического эксперимента, под которым в данном случае понимается расчёт обобщённого показателя качества функционирования ЭАК k и выходных эксплуатационных показателей λ , $\Pi_{\text{ЭАК}}^{\text{ЭАК}}$ при определённых сочетаниях переменных согласно матрице планирования эксперимента [15].

3. Граничные условия, отражающие диапазон изменения оптимизируемых параметров. Анализ показывает, что для всех параметров может быть задано только одно нижнее граничное условие – условие их неотрицательности, то есть $k_N \geq 0$; $t_n^3 \geq 0$; $t_p \geq 0$. Верхние граничные условия для всех показателей отсутствуют.

После приведения ограничений к удобной форме получена математическая модель оптимизации (ММО) показателей качества функционирования ЭАК в виде:

$$\begin{cases} k = a_0 + a_1 k_N + a_2 t_n^3 + a_3 t_p \rightarrow \max; \\ a_{11}k_N + a_{12}t_n^3 + a_{13}t_p \geq \lambda^0 - S_0^\lambda - a_{10}; \\ a_{11}k_N + a_{12}t_n^3 + a_{13}t_p \geq \lambda^0 + S_0^\lambda - a_{10}; \\ a_{21}k_N + a_{22}t_n^3 + a_{23}t_p \geq \Pi_{\text{ЭАК}}^0 - S_0^{\Pi_{\text{ЭАК}}} - a_{20}; \\ a_{21}k_N + a_{22}t_n^3 + a_{23}t_p \geq \Pi_{\text{ЭАК}}^0 + S_0^{\Pi_{\text{ЭАК}}} - a_{20}; \\ a_{31}k_N + a_{32}t_n^3 + a_{33}t_p \geq (t_n^3 \div t_p)^0 - S_0^t - a_{30}; \\ a_{31}k_N + a_{32}t_n^3 + a_{33}t_p \geq (t_n^3 \div t_p)^0 + S_0^t - a_{30}; \\ k_N \geq 0; t_n^3 \geq 0; t_p \geq 0. \end{cases} \quad (14)$$

После установления параметров системы (14) получена ММО показателей качества функционирования ЭАК разрезов Кузбасса:

$$\begin{cases} k = -0,268 + 0,209k_N + 0,397t_n^3 - 0,0415t_p \rightarrow \max; \\ 0,130k_N + 0,230t_n^3 - 0,0250t_p \geq 0,917; \\ 0,130k_N + 0,230t_n^3 - 0,0250t_p \leq 1,083; \\ t_n^3 + 0,0619t_p \geq 4,822; \\ t_n^3 + 0,0619t_p \leq 5,134; \\ k_N \geq 5,124; \\ k_N \leq 6,653; \\ k_N \geq 0; t_n^3 \geq 0; t_p \geq 0. \end{cases} \quad (15)$$

Математическая модель (15) представляет собой задачу линейного программирования, которая может быть решена стандартными способами.

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 : MSc 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. Vemba, M.M. Loading and transport system at SMC-Optimization // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – Apr 2004. – P. 139-147.
5. Krzyzanowska, J. The impact of mixed fleet hauling on-mining operations at Venetia mine // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – Apr 2007. – Vol. 107. – P. 215-224.
6. Mkhathshwa, S.V. Optimization of the loading and hauling fleet at Mamatwan open pit mine // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – Apr 2009. – Vol. 109. – P. 223-232.
7. Вуейкова, О.Н. Обоснование рациональной структуры автомобильно-экскаваторного комплекса открытого горнорудного карьера : дис. ... канд. техн. наук. – ЮУрГУ, Оренбург, 2013.
8. Воронов, Ю.Е. Оптимальное проектирование карьерных горных машин. – М. : Инновационное машиностроение, 2015. – 351 с.
9. Воронов, Ю.Е. Математическая модель оптимизации параметров карьерных автосамосвалов / Ю.Е. Воронов, С.В. Басманов // Известия вузов. Горный журнал. – 2007. – № 8. – С. 58-62.
10. Полетаев, В.А. Основы управления качеством функционирования машин. – Кемерово: КузГТУ, 1993. – 234 с.
11. Солод, Г.И. Основы квалиметрии. – М.: Издательство Московского горного института, 1991. – 84 с.
12. 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.
13. 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, Vol. 105, 01048.
14. Voronov, An. Operation Quality Indicators for Shovel-Truck Systems at Open-Pit Coal Mines / An. Voronov, Yu. Voronov, Ar. Voronov, N. Demirel // The IVth International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment). – Kemerovo, Russian Federation, November 20-22, 2019. – E3S Web of Conferences, Vol. 105, 01058.
15. Воронов, Ю.Е. Методология проектирования станков вращательного бурения нового технического уровня для разрезов : дис. ... д-ра техн. наук. – КузГТУ, Кемерово, 1996.

Anton Yu. Voronov

АО “УК “Кузбассразрезугол”, 4а, avenue Pionersky, Kemerovo, 650054, Russia

A MATHEMATICAL MODEL FOR OPTIMIZATION OF MINING SHOVEL-TRUCK SYSTEM OPERATION

Abstract: *The urgency of the discussed issue. Material handling operations at open-pit mines are carried out mainly by heavy shovel-truck systems (STSs). One of the main problems of STSs is a rather low level of its operation quality. A powerful way to improve the STS operation quality is its optimization, based on the systems approach, according to which the work of the constituent elements of the system is studied by analyzing the STS operation as a whole. With regard to optimization of the STS performance indicators, the systematic approach means their optimal consistency with each other subject to meeting the requirements for the STS operation. The first step in optimizing the STS operation is the development of its mathematical model.*

The main aim of the study is the development of the mathematical model for optimization of the mining STS operation.

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

The results. Performance indicators of the STS operation are optimized according to its mathematical model, which includes the objective function and constraints, presented as linear regression analysis equations, directly linking the corresponding output operational indicators with optimized parameters. This makes it possible to use the mathematical apparatus of linear programming for solving. It is proposed to use generalized estimates as the optimization criterion, and individual parameters for optimizing the STS operation as

optimized parameters. This simplifies optimization and increases its accuracy, and also provides the best degree of consistency of the optimized parameters between themselves and the external environment.

Keywords: open-pit mining; shovel-truck system; mathematical model for optimization of the STS operation.

Article info: received February 12, 2020

DOI: 10.26730/1816-4528-2020-2-13-18

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. Vemba, M.M. Loading and transport system at SMC-Optimization // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – Apr 2004. – P. 139-147.
5. Krzyzanowska, J. The impact of mixed fleet hauling on-mining operations at Venetia mine // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – Apr 2007. – Vol. 107. – P. 215-224.
6. Mkhathshwa, S.V. Optimization of the loading and hauling fleet at Mamatwan open pit mine // The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. – Apr 2009. – Vol. 109. – P. 223-232.
7. 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)
8. Voronov, Y.E. Optimalnoe proektirovanie gornyh kariernyh mashin [Optimal design of open-pit mining machines]. Moscow: Innovative Engineering, 2015. 351 p. (rus)
9. Voronov, Y.E. Matematicheskaja model optimizatsii parametrov kariernyh avtosamosvalov [A mathematical model for optimizing the parameters of mining haul trucks] / Y.E. Voronov, S.V. Basmanov // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal. 2007. № 8. P. 59-62. (rus)
10. Poletaev, V.A. Osnovy upravlenija kachestvom funkcionirovanija mashin [The basics of machine quality control]. Kemerovo: KuzSTU, 1993. 234 p. (rus)
11. Solod, G.I. Osnovy kvalimetrii [The basics of quality control]. Moscow: Moscow Mining Institute, 1991. 84 p. (rus)
12. 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.
13. 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, 01048.
14. Voronov, An. Operation Quality Indicators for Shovel-Truck Systems at Open-Pit Coal Mines / An. Voronov, Yu. Voronov, Ar. Voronov, N. Demirel // 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, 01058.
15. Voronov, Y.E. Metodologija proektirovanija stankov vrashchatelnogo burenija novogo tekhnicheskogo urovnja dlja razrezov [Design methodology for rotary drilling machines of a new technical level for open-pit coal mines]. DSc thesis. Kemerovo: KuzSTU, 1996. (rus)

Библиографическое описание статьи

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

Reference to article

Voronov A.Yu. A mathematical model for optimization of mining shovel-truck system operation. Mining Equipment and Electromechanics, 2020, no.2 (148), pp. 13-18.