

## ГОРНЫЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

**УДК [621.879:622.271.4]:519.876.5**

**Ю.Е. Воронов, П.А. Зыков**

### **РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ КАРЬЕРНЫХ ОДНОКОВШОВЫХ ЭКСКАВАТОРОВ**

Основой оптимального проектирования является системный подход, который заключается в том, что при проектировании машины должно обеспечиваться оптимальное соотношение получаемых параметров и их обратная связь с исходными (входными) показателями.

Исходными данными для проектирования карьерного экскаватора являются характеристика горной массы, для экскавации которой он предназначен, а также технические требования к карьерному экскаватору, регламентированные нормативными документами или обусловленные потребностями потребителей.

Обеспечение требуемых показателей работы экскаватора в данных условиях с учетом технических и технологических требований во многом зависит от качества выполнения им процесса экскавации, который состоит из основных (копание горной массы в забое, поворот ковша к месту разгрузки, разгрузка ковша в транспортное средство или отвал) и вспомогательных операций (перемещение в забое). Характеристика горной массы определяет конструктивные параметры экскаватора, а также требуемые для его эффективной работы режимные параметры. Для обеспечения необходимых режимных параметров экскавации горной массы, имеющей данные физико-механические свойства, а также выполнения вспомогательных операций экскаватор должен иметь соответствующие исполнительные механизмы и системы – силовую установку, рабочий орган, ходовую часть, поворотную платформу, систему управления рабочим органом и ходовой частью и т.п., обладающие соответствующими характеристиками. Все эти системы и механизмы экскаватора являются зависимыми друг от друга, а их параметры, будучи взаимосвязанными, определяют основные показатели технической характеристики проектируемого экскаватора.

Карьерный одноковшовый экскаватор как система характеризуется структурой и параметрами. Структура экскаватора определяет ее составные части и связи между ними и должна обеспечивать оптимальное его функционирование, для чего характеризующие машину параметры должны быть оптимизированы (см. рис. 1).

В качестве критерия оптимизации целесооб-

разно использовать обобщенные оценки технического уровня (качества), а в качестве оптимизируемых параметров – его единичные показатели. Такой подход позволяет на первом этапе понизить размерность задачи оптимизации и тем самым упростить ее решение, а также иметь в процессе проектирования объективные оценки принимаемых решений. Модели целевой функции и ограничений математической модели оптимизации должны формироваться в результате анализа функционирования экскаватора как системы и представляются в виде уравнений регрессионного анализа, непосредственно связывающих соответствующие показатели с оптимизируемыми параметрами.

Основными показателями, оценивающими техническую, технологическую и экономическую эффективность техники, осуществляющей разработку горных пород являются [1]:

- показатель производительности,  $K_n$ ;
- показатель материалоемкости,  $K_m$ ;
- показатель энергоемкости,  $K_e$ .

Будем рассматривать их в качестве выходных эксплуатационных показателей.

Показатель производительности в соответствии с [1] может быть записан в следующем виде ( $\text{м}^3/\text{kBt}$ ):

$$K_n = \frac{\Pi \cdot T_p}{N_{np}}, \quad (1)$$

где  $N_{np}$  – мощность привода, кВт;  $\Pi$  – теоретическая производительность экскаватора,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $T_p$  – ресурс экскаватора, ч.

Удельная теоретическая производительность  $\Pi_y$  определяется как отношение теоретической производительности  $\Pi$  к емкости ковша экскаватора  $E_k$ , следовательно:

$$\Pi = \Pi_y \cdot E_k, \quad (2)$$

где  $\Pi_y$  – удельная теоретическая производительность,  $\text{м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^3)$ ;  $E_k$  – емкость ковша экскаватора,  $\text{м}^3$ .

Удельная мощность привода определяется отношением мощности привода к емкости ковша (основному параметру) экскаватора ( $\text{kBt}/\text{м}^3$ ):

$$N_{np}^y = \frac{N_{np}}{E_k}. \quad (3)$$

Удельная производительность может быть записана также в следующем виде:

$$\Pi_y = \frac{\lambda}{W}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – функциональный критерий качества экскаваторов [2], кВт;  $W$  – удельная энергия экскавации горной массы [2], кДж/м<sup>3</sup>.

Подставляя (2), (3) и (4) в (1), получим:

$$K_n = \frac{\lambda \cdot T_p}{W \cdot N_{np}^y}. \quad (5)$$

Удельная энергия экскавации играет роль масштабного фактора, который ставит в один ряд все экскаваторы, позволяя сравнивать их технический уровень и качество, и не зависит от типа, модели и конструктивного исполнения экскаватора.

Поэтому, чтобы исключить влияние емкости ковша на показатель производительности экскаватора, умножим обе части выражения (5) на удельную энергию экскавации горной массы  $W$ .

В итоге зависимость выглядит следующим образом:

$$K_n W = \frac{\lambda \cdot T_p}{N_{np}^y}. \quad (6)$$

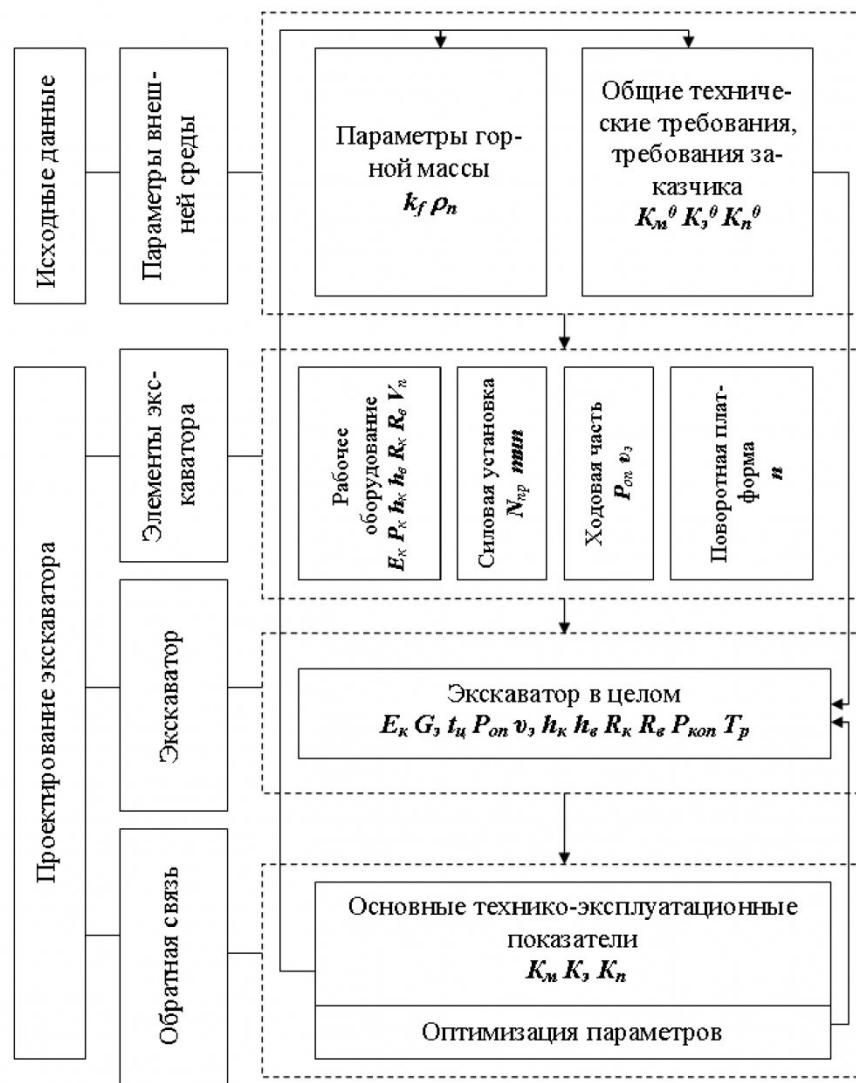


Рис. 1 .Схема проектирования карьерного экскаватора

$\rho_n$  – плотность горной массы, т/м<sup>3</sup>;  $k_f$  – удельное сопротивление копанию, МПа;  $N_{np}$  – мощность привода, кВт;  $P_{kon}$  – максимальное усилиекопания, кПа;  $E_k$  – емкость ковша экскаватора, м<sup>3</sup>;  $G_s$  – рабочая масса экскаватора, т;  $t_u$  – продолжительность цикла, с;  $P_{on}$  – среднее удельное давление на грунт, кПа;  $v_3$  – скорость передвижения, км/ч;  $h_k$  – наибольшая высота копания, м;  $h_v$  - наибольшая высота выгрузки, м;  $R_k$  – наибольший радиус копания, м;  $R_v$  - наибольший радиус выгрузки, м;  $V_n$  – скорость подъёма блока ковша, м/с;  $n$  – частота вращения платформы, об/мин;  $T_p$  – ресурс экскаватора, ч;  $K_n$  – показатель производительности, м<sup>3</sup>/кВт;  $K_m$  – показатель материалоемкости, т/м<sup>3</sup>;  $K_s$  – показатель энергоемкости, кВт/м<sup>3</sup>.

Второй важнейший эксплуатационный показатель – это показатель материлоемкости (удельная масса), который обычно используется для оценки проектных вариантов. Удельная масса входит в состав номенклатуры показателей качества, наряду с теоретической производительностью по ГОСТ 4.377-85 и является интегральным показателем, характеризующим технологичность конструкции, надежность и другие показатели. Удельная масса может быть определена по формуле [1] ( $\text{т}/\text{м}^3$ ):

$$K_M = \frac{G_3}{\Pi \cdot T_p}, \quad (7)$$

где  $G_3$  – рабочая масса экскаватора, т.

Подставив (2) в формулу (7) получим:

$$K_M = \frac{G_3}{\Pi_y \cdot E_K \cdot T_p}, \quad (8)$$

где  $\frac{G_3}{E_K} = k_M$  – металлоемкость экскаватора,  $\text{т}/\text{м}^3$ .

Подставляя (4) в (8), получим выражение:

$$K_M = \frac{k_M \cdot W}{\lambda \cdot T_p}. \quad (9)$$

Для того, чтобы исключить влияние емкости ковша на удельную массу экскаватора, разделим обе части выражения (9) на удельную энергию экскавации горной массы  $W$ .

В итоге зависимость выглядит следующим образом:

$$K_M/W = \frac{k_M}{\lambda \cdot T_p}. \quad (10)$$

Третьим важнейшим эксплуатационным показателем, характеризующим техническое совершенство экскаваторов, является показатель энергоемкости (удельный расход энергии). Формулу можно записать в следующем виде [1] ( $\text{kВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$ ):

$$K_3 = \frac{N_{np}}{\Pi}. \quad (11)$$

Выразив мощность привода из (3), подставляем ее и (2) в (11):

$$K_3 = \frac{N_{np}^y}{\Pi_y}. \quad (12)$$

Подставив выражение (4) в (12), получим:

$$K_3 = \frac{N_{np}^y \cdot W}{\lambda}. \quad (13)$$

Чтобы также исключить влияние емкости ковша на удельный расход энергии экскаватора, разделим обе части выражения (13) на удельную энергию экскавации горной массы  $W$ .

В итоге получаем зависимость:

$$K_3/W = \frac{N_{np}^y}{\lambda}. \quad (14)$$

Поскольку четкого требования по значениям эксплуатационных показателей в нормативных документах не зафиксировано, будем исходить из их фактических значений для группы карьерных экскаваторов.

При этом регламентированные значения ограничений по удельной массе, удельному расходу энергии и показателю производительности будут равны

$$K_M^0 = K_M/W \rightarrow \min;$$

$$K_3^0 = K_3/W \rightarrow \min;$$

$$K_n^0 = K_n \times W \rightarrow \max.$$

Анализ выходных технико-эксплуатационных показателей с учетом взаимосвязей между ними позволил установить необходимую и достаточную номенклатуру оптимизируемых показателей:  $k_M$  – металлоемкость экскаватора;  $N_{np}^y$  – удельная мощность привода;  $\lambda$  – функциональный критерий качества экскаваторов;  $T_p$  – ресурс экскаватора.

Задача установления степени влияния каждого из оптимизируемых параметров на обобщенный показатель технического уровня (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.

При решении задачи оптимизации параметров карьерных одноковшовых экскаваторов имеют место следующие ограничения.

1. Ограничение по соответствию фактических значений эксплуатационных показателей  $K_M$ ,  $K_3$ ,  $K_n$  регламентированным  $K_M^0$ ,  $K_3^0$ ,  $K_n^0$ .

Модели этих ограничений могут быть получены из регрессионных связей соответствующих выходных эксплуатационных показателей с оптимизируемыми параметрами:

$$\begin{cases} a_{10} + a_{11}k_M + a_{12}N_{np}^y + a_{13}\lambda + a_{14}T_p \geq K_n^0 \\ a_{20} + a_{21}k_M + a_{22}N_{np}^y + a_{23}\lambda + a_{24}T_p \leq K_M^0 \\ a_{30} + a_{31}k_M + a_{32}N_{np}^y + a_{33}\lambda + a_{34}T_p \leq K_3^0 \\ \lambda \geq \lambda_{\min}; \lambda \leq \lambda_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

где  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$  – минимальное и максимальное значение функционального критерия качества экскаваторов по группе рассматриваемых экскаваторов, кВт.

Поскольку в зависимости (15) выходные экс-

плуатационные показатели ( $K_n^0$ ,  $K_m^0$ ,  $K_\vartheta^0$ ), при нахождении регрессионной зависимости от оптимизируемых параметров, будут обладать разбросом, определяемым соответствующими значениями стандартных отклонений  $S_0^{Kn}$ ,  $S_0^{K\vartheta}$  и  $S_0^{Km}$ , ограничения можно записать в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{10} + a_{11}k_m + a_{12}N_{np}^y + a_{13}\lambda + a_{14}T_p \leq K_n^0 + S_0^{Kn} \\ a_{10} + a_{11}k_m + a_{12}N_{np}^y + a_{13}\lambda + a_{14}T_p \geq K_n^0 - S_0^{Kn} \\ a_{20} + a_{21}k_m + a_{22}N_{np}^y + a_{23}\lambda + a_{24}T_p \leq K_m^0 + S_0^{Km} \\ a_{20} + a_{21}k_m + a_{22}N_{np}^y + a_{23}\lambda + a_{24}T_p \geq K_m^0 - S_0^{Km} \\ a_{30} + a_{31}k_m + a_{32}N_{np}^y + a_{33}\lambda + a_{34}T_p \leq K_\vartheta^0 - S_0^{K\vartheta} \\ a_{30} + a_{31}k_m + a_{32}N_{np}^y + a_{33}\lambda + a_{34}T_p \geq K_\vartheta^0 - S_0^{K\vartheta} \\ \lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max} \end{array} \right. \quad (16)$$

Параметры ограничений (16) и целевой функции, устанавливается в результате математического эксперимента, под которым в данном случае понимается расчет обобщенного показателя технического уровня (качества)  $k$  и выходных эксплуатационных показателей  $K_m$ ,  $K_\vartheta$ ,  $K_n$  при определенных сочетаниях переменных согласно матрице планирования эксперимента.

П. Границы условия, отражающие диапазон изменения оптимизируемых параметров, могут быть определены следующим образом. Анализ их показывает, что для всех них может быть задано только одно нижнее граничное условие – и это условие их неотрицательности, т.е.  $k_m \geq 0$ ;  $N_{np}^y \geq 0$ ;  $\lambda \geq 0$ ;  $T_p \geq 0$ . Верхние граничные условия для всех показателей отсутствуют.

После приведения ограничений к удобной для исследования форме получена математическая модель оптимизации (ММО) показателей технического уровня (качества) и параметров карьерных одноковшовых экскаваторов в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} k = a_0 + a_1k_m + a_2N_{np}^y + a_3\lambda + a_4T_p \rightarrow max \\ a_{10} + a_{11}k_m + a_{12}N_{np}^y + a_{13}\lambda + a_{14}T_p \leq K_n^0 + S_0^{Kn} \\ a_{10} + a_{11}k_m + a_{12}N_{np}^y + a_{13}\lambda + a_{14}T_p \leq K_n^0 + S_0^{Kn} ; \\ a_{10} + a_{11}k_m + a_{12}N_{np}^y + a_{13}\lambda + a_{14}T_p \geq K_n^0 - S_0^{Kn} ; \\ a_{20} + a_{21}k_m + a_{22}N_{np}^y + a_{23}\lambda + a_{24}T_p \leq K_m^0 + S_0^{Km} ; \\ a_{20} + a_{21}k_m + a_{22}N_{np}^y + a_{23}\lambda + a_{24}T_p \leq K_m^0 + S_0^{Km} ; \\ a_{20} + a_{21}k_m + a_{22}N_{np}^y + a_{23}\lambda + a_{24}T_p \geq K_m^0 - S_0^{Km} ; \\ a_{30} + a_{31}k_m + a_{32}N_{np}^y + a_{33}\lambda + a_{34}T_p \leq K_\vartheta^0 + S_0^{K\vartheta} ; \\ a_{30} + a_{31}k_m + a_{32}N_{np}^y + a_{33}\lambda + a_{34}T_p \leq K_\vartheta^0 + S_0^{K\vartheta} ; \\ a_{30} + a_{31}k_m + a_{32}N_{np}^y + a_{33}\lambda + a_{34}T_p \geq K_\vartheta^0 - S_0^{K\vartheta} ; \\ \lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max} ; \\ k_m \geq 0; \quad N_{np}^y \geq 0; \quad \lambda \geq 0; \quad T_p \geq 0 \end{array} \right. \quad (17)$$

Таким образом, в результате исследований получена математическая модель оптимизации показателей технического уровня и параметров карьерных гидравлических экскаваторов.

Данная ММО относится к задачам линейного программирования и может быть решена стандартными графическим или аналитическим способами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безвзрывные технологии открытой добычи твердых полезных ископаемых [Текст] : научное издание / А. Р. Маттис [и др.] ; ред. В. Н. Опарин ; Ин-т горного дела СО РАН ; Ин-т горного дела УрО РАН. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2007. – 337 с.
2. Воронов, Ю. Е. Обоснование и определение показателей технического уровня карьерных одноковшовых экскаваторов / Ю. Е. Воронов, П. А. Зыков // Вестник КузГТУ – 2011. – № 2. С. 67-70.

Авторы статьи:

Воронов  
Юрий Евгеньевич,  
докт. техн. наук, профессор, зав.  
каф. «Автомобильные перевозки»  
КузГТУ.  
Тел. 8 (384-2) 39-69-76

Зыков  
Петр Анатольевич,  
старший преп. каф. «Автомобили и  
автомобильные перевозки» филиала  
КузГТУ в г. Новокузнецке.  
E-mail: ZykovPetr@yandex.ru