

DOI: 10.26730/1999-4125-2020-3-70-79

УДК 622.6

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

MAXIMIZING OF OPEN-PIT MINING EFFICIENCY

Зыков Петр Анатольевич,

канд. техн. наук, доцент, e-mail: zykovpetr@yandex.ru

Zykov Pyotr A., C. Sc. in Engineering, Associate Professor

Зварыч Евгений Богданович,

канд. техн. наук, доцент, e-mail: zvarich83@mail.ru

Zvarych Evgeny B., C. Sc. in Engineering, Associate Professor

Карасев Андрей Николаевич,

канд. биол. наук, доцент, e-mail: ank1966@rambler.ru

Karasev Andrei N., C. Sc. in Biology, Associate Professor

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 650000, Россия,
г. Кемерово, ул. Весенняя, 28
T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian
Federation

Аннотация:

В работе содержится новое решение актуальной научной задачи повышения качества проектирования и функционирования карьерных экскаваторов за счет оптимизации их параметров, что имеет существенное значение для развития теории и практики проектирования и эксплуатации горных машин. Целью исследования была разработка методик и прикладных средств для оценки технического уровня карьерных экскаваторов при их выборе для конкретных горно-геологических и технических условий эксплуатации, а также при их проектировании. Использовались методы статистической обработки данных и построения регрессионных моделей, математического экспериментирования, анализа и синтеза, методы комплексной оценки показателей технического уровня, математическое моделирование и аппарат линейного программирования. В результате разработаны методики комплексной оценки технического уровня и оптимизации параметров карьерных одноковшовых экскаваторов, разработан программный комплекс, основанный на данных методиках и позволяющий производить научно-обоснованный выбор экскаваторов, обладающих оптимальными для заданных условий параметрами.

Ключевые слова: карьерные одноковшовые экскаваторы, технический уровень, показатели качества, условия эксплуатации, открытые горные работы.

Abstract:

The objective set in the research is the following: to develop the methodology and application tools for assessment of the open-pit excavators engineering level when selecting and designing them for specific mining-geological and technical service conditions. To achieve the objective the methods of statistical data analysis, methods of regression models and of mathematical experimentation building, analysis and synthesis, methods of comprehensive assessment of the engineering level indicators, as well as mathematical modeling and appliance of linear algorithm were used. As a result, the methodology was developed for comprehensive assessment of engineering level and optimization of open-pit shovel excavators parameters, there was also developed a software package, based on the methodology mentioned above, that allowed science-based selection of excavators possessing optimum parameters for the specified conditions.

Key words: open-pit shovel excavator, engineering level, quality indicators, service conditions, open-pit mining.

Введение

Карьерные одноковшовые экскаваторы являются основным выемочным оборудованием на карьерах, они выполняют более 80% общего

объема работ. В связи с этим качество выполнения ими своей функции в наибольшей степени определяет эффективную работу всего горнодобывающего предприятия [1, 2].

В настоящее время на российских горных предприятиях идет процесс технического перевооружения устаревшего экскаваторного парка за счет внедрения нового поколения выемочно-погрузочных машин, как правило, с гидравлическим приводом. Выбор экскаваторов специалистами горнодобывающих предприятий производится в основном исходя из опыта эксплуатации предыдущих машин, их стоимости и затрат на эксплуатацию. При этом оценка качества функционирования машины в условиях данного предприятия не производится. Такой подход имеет много недостатков, главный из которых заключается в невозможности «связать» между собой параметры выбранной машины и параметры окружающей среды, и поэтому не приводит к существенному улучшению качества эксплуатации экскаваторов. Для повышения качества функционирования карьерной экскаваторной техники необходим системный подход при выборе и проектировании машин с необходимыми параметрами [3, 4].

Применение научно обоснованных методик, позволяющих выбрать или разработать машину с оптимальными по критерию качества параметрами для определенных горнотехнических условий, позволит повысить эффективность открытых горных работ, снизить себестоимость работ, повысить производительность экскаваторно-автомобильного комплекса. Разработка программного комплекса, основанного на таких методиках, позволит упростить и автоматизировать задачу оптимального выбора модели экскаватора под заданные условия эксплуатации.

Методы
Методика оценки качества функционирования экскаватора. Обеспечение требуемых показателей работы экскаватора в заданных условиях с учетом технических, технологических и эксплуатационных требований во многом зависит от качества выполнения им процесса экскавации. Качество экскаватора может проявиться только в процессе выполнения им своей функции в соответствии с назначением – при экскавации горной массы в определенных условиях эксплуатации [1, 5-7], и экскаватор нельзя рассматривать в отрыве от этих элементов общей системы экскавации «экскаватор – горная масса – человек – внешняя среда».

Основной целью оценки качества взаимодействия экскаваторов с разрабатываемой горной массой и внешней средой как элементов общей системы экскавации является установление того, насколько эффективно каждый из них выполняет свою функцию в конкретных горно-

геологических и технических условиях [8, 9]. Оценка качества позволит научно обоснованно решать проблему выбора и проектирования карьерных экскаваторов для условий конкретного горного предприятия.

В настоящее время наибольшее распространение и развитие получили комплексные методы оценки качества, которые основаны на применении обобщенного показателя качества продукции. Обобщенный показатель представляет собой функцию от единичных (групповых, комплексных) показателей качества продукции. Он может быть выражен: главным показателем, отражающим основное назначение продукции; интегральным показателем качества продукции; средневзвешенным показателем.

В общем случае количественное определение комплексного показателя качества предполагает выполнение следующих операций:

- получение значений единичных показателей качества в одном масштабе путем приведения их к некоторым относительным (обычно безразмерным) единицам;
- определение весовостей единичных показателей качества;
- вычисление средневзвешенного показателя, который и принимается за обобщенный показатель качества.

Большинство методик комплексной оценки качества предусматривает выполнение всех этих операций. Различие этих методик заключается в подходах к выбору базового образца (эталона), определению зависимости между показателями отдельных свойств и их оценками, определению весовости этих свойств и способу суммирования единичных оценок качества в обобщенную оценку.

Проведенный анализ существующих методик качества показал, что, как и для большинства горных машин, наиболее приемлемым аналогом для оценки технического уровня карьерных одноковшовых экскаваторов является методика Г.И. Солода, предложенная в 1991 г. [10]. Она основывается на фундаментальных принципах квалиметрии и позволяет количественно оценивать технический уровень и качество функционально однородных машин разных типов, типоразмеров и конструктивных исполнений.

Методика оптимизации параметров экскаватора при проектировании. В настоящее время нет достаточных нормативно-технических материалов, регламентирующих такое важнейшее направление повышения качества изделий, как их оптимальное проектирование.

Каждый объект проектирования имеет определенное назначение и как система характеризуется структурой и параметрами. Структура, которая определяет составные части объекта проектирования и связи между ними, должна обеспечивать надежное функционирование изделия и достижение поставленных перед ним

целей в соответствии с назначением. Каждая из составных частей (элементов) объекта проектирования при этом также характеризуется своими собственными параметрами, которые так или иначе связаны друг с другом и с параметрами объекта. Все эти характеристики (структура объекта проектирования, его параметры, параметры его элементов и взаимосвязи между ними) составляют исходную информацию, необходимую для оптимального проектирования.

Для оптимизации параметров объекта проектирования необходимо составить формализованную математическую модель. Математическая модель оптимизации (ММО) состоит из целевой функции, ограничений и граничных условий. Целевая функция представляет собой математическое описание зависимости цели использования объекта проектирования от оптимизируемых параметров и в общем виде может быть выражена в виде:

$$Ц = f(P_j) \rightarrow \max(\min), \quad (1)$$

где P_j – оптимизируемые параметры ($j = 1, 2, \dots, m$, где m – число оптимизируемых параметров).

1. Граничные условия показывают предельно допустимые значения переменных. В общем случае граничные условия являются двухсторонними:

$$b_j \geq P_j \geq a_j, \quad (2)$$

однако часто верхняя граница b_j отсутствует ($b_j \rightarrow \infty$), а нижняя a_j равна нулю. Таким граничным условием накладывается только требование неотрицательности оптимизируемого параметра, т.е. $P_j \geq 0$.

Ограничения в ММО могут представлять собой описания связей между оптимизируемыми параметрами, формализацию выражений по соответствию фактических показателей объекта проектирования регламентированным, а также формализацию дополнительных целей, которые не вошли в целевую функцию. Кроме того, ограничения вводятся в ММО с целью уменьшения размерности задачи оптимизации для упрощения ее постановки и решения. Ограничения выражаются либо в виде зависимостей, описывающих связи между оптимизируемыми параметрами:

$$c_j = f_c(P_j); j = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

2. либо в виде неравенств, описывающих различные конструктивные, эксплуатационные и нормативные ограничения, –

$$H_k = f_n(P_j); k = 1, 2, \dots, l. \quad (4)$$

Таким образом, процесс проектирования любого объекта с содержательной точки зрения включает сбор исходной информации об объекте проектирования, оптимизацию его параметров исходя из целей, поставленных перед объектом, принятие на ее основе решений и оформление результатов в виде нормативно-технической

документации, которая служит основой при воплощении проекта в готовую продукцию. Надо отметить, что в рыночных экономических условиях государственные нормативные документы, использовавшиеся повсеместно ранее, во многом теряют свое значение, поэтому указанная нормативно-техническая документация разрабатывается каждым потребителем применительно к своим конкретным условиям и может быть представлена в виде технического задания.

Результаты

Разработка методики комплексной оценки технического уровня и оптимизации параметров карьерных одноковшовых экскаваторов

Основой методики является функциональный критерий машины, определяющий ее основное назначение. Г.И. Солод предлагал определять этот критерий в виде произведения производительности горной машины по выполнению своей функции в заданных условиях и удельной энергии процесса выполнения машиной своей функции в этих условиях.

В соответствии с этим для карьерных экскаваторов функциональный критерий оценки их качества можно представить в виде (кДж/ч):

$$\lambda = P \cdot W, \quad (5)$$

где P – расчетно-теоретическая производительность экскаватора, м³/ч; W – удельная энергия экскавации горной массы, кДж/м³.

Выражение для расчета функционального критерия для одноковшовых экскаваторов типа «прямая лопата» в определенных условиях эксплуатации (кВт/м³) примет вид:

$$\lambda' = \frac{3600 \cdot k_n \cdot k_e \cdot k_{кв}}{t_u \cdot k_p} \left[k_f + \frac{k_n}{k_p} \rho_n \cdot g \left(\frac{h_k}{2} + \frac{\pi^2}{900 \cdot \alpha \cdot g} (n \cdot R_e)^2 \right) \right], \quad (6)$$

для карьерных одноковшовых экскаваторов типа «обратная лопата» (кВт/м³):

$$\lambda' = \frac{3600 \cdot k_n \cdot k_e \cdot k_{кв}}{t_u \cdot k_p} \left[k_f + \frac{k_n}{k_p} \rho_n \cdot g \left(\left(\frac{h_k}{2} + h_e \right) + \frac{\pi^2}{900 \cdot \alpha \cdot g} (n \cdot R_e)^2 \right) \right], \quad (7)$$

где α – угол поворота экскаватора на разгрузку, град; h_e – наибольшая высота выгрузки экскаватора, м; k_n – коэффициент наполнения ковша; k_p – коэффициент разрыхления горной массы; k_e – коэффициент использования рабочего времени экскаватора; $k_{кв}$ – коэффициент, учитывающий квалификацию машиниста и качество управления; k_f – удельное сопротивление породы копанью, кПа; ρ_n – плотность горной массы, т/м³; h_k – наибольшая высота копания

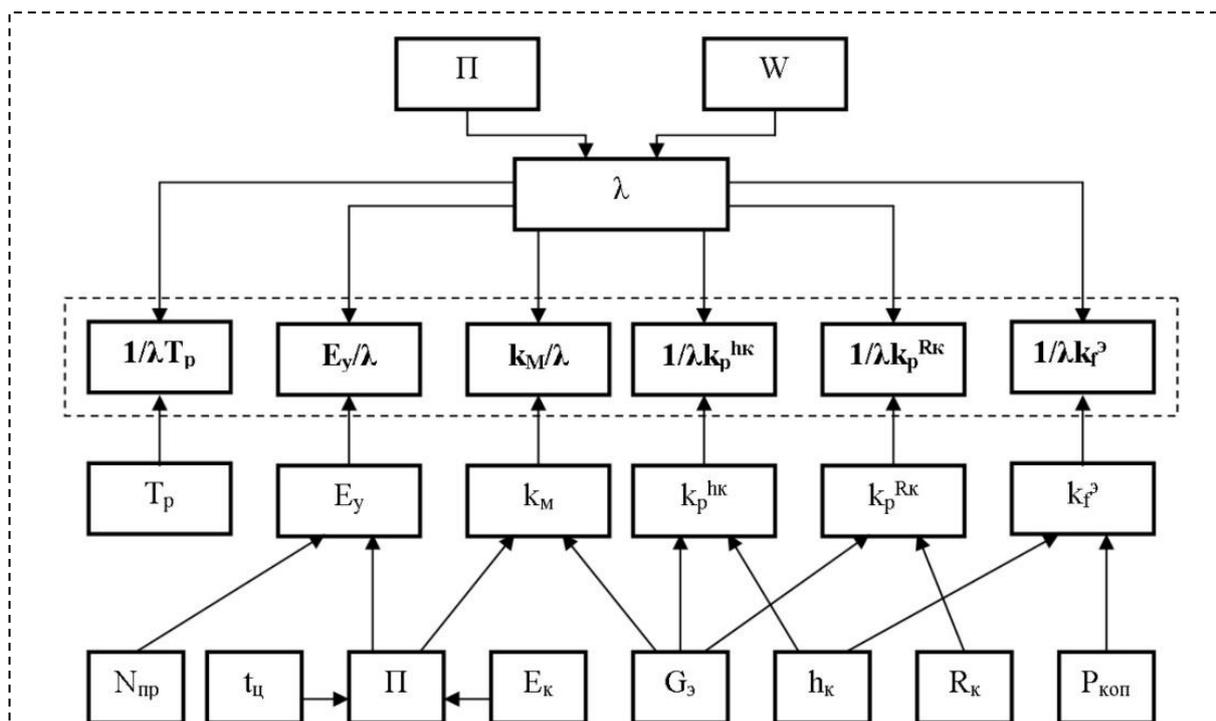


Рис. 1. Комплекс показателей технического уровня карьерных экскаваторов:

λ – функциональный критерий, кДж/ч; k_f^3 – удельное усилие копания экскаватора, МПа; E_y – удельная энергоёмкость, кВт/(м³/ч); k_M – удельная металлоёмкость, т/(м³/ч); k_p^{hk} – удельная наибольшая высота копания; k_p^{Rk} – удельный наибольший радиус копания; T_p – ресурс, ч; $P_{коп}$ – наибольшее усилие копания, кН; N_{np} – мощность привода, кВт; Π – производительность, м³/ч; $G_э$ – эксплуатационная масса экскаватора с рабочим оборудованием, т; h_K – наибольшая высота копания, м; R_K – наибольший радиус копания, м; $t_{ц}$ – теоретическая продолжительность цикла, с; E_K – ёмкость ковша, м³; W – удельная энергия экскавации горной массы, кДж/м³

Fig. 1. The complex of indicators that determine engineering level of open-pit shovel excavators:

λ – functional criterion, kJ/h; k_f^3 – specific excavator digging force, MPa; E_y – specific energy density, kW/(m³/h); k_M – specific metal content, t/(m³/h); k_p^{hk} – specific maximum digging height; k_p^{Rk} – specific maximum digging radius; T_p – service life, h; $P_{коп}$ – specific digging force, kN; N_{np} – drive power, kW; Π – productive capacity, m³/h; $G_э$ – operation weight of the excavator together with operating equipment, t; h_K – maximum digging height, m; R_K – maximum digging radius, m; $t_{ц}$ – theoretical cycle duration, s; E_K – shovel capacity, m³; W – specific energy of mining rock excavation, kJ/m³

экскаватора, м; n – скорость поворота платформы, рад/с; $R_э$ – наибольший радиус выгрузки, м; $t_{ц}$ – время цикла, с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Показатели качества экскаватора выбираются из ГОСТ 4.377-85, причем первостепенное значение имеют показатели назначения, надежности, технологичности и существенно меньшее значение имеют остальные группы показателей, что связано с выбранным критерием. Также для уменьшения числа показателей некоторые из параметров можно привести к удельному виду (достоинством любых удельных показателей является то, что они объединяют в себе несколько абсолютных), что вполне соответствует принципам квалиметрии.

В качестве показателей, определяющих технический уровень карьерных одноковшовых экскаваторов, предлагаются следующие: удельная

энергоёмкость (E_y); удельная металлоёмкость (k_M); удельное усилие копания экскаватора (k_f^3); удельная наибольшая высота и радиус копания (k_p^{hk} и k_p^{Rk}); ресурс экскаватора (T_p).

В итоге получен комплекс из шести показателей, определяющих технический уровень карьерных одноковшовых экскаваторов (рис. 1).

Обобщенный показатель качества экскаватора определяется в соответствии с методикой по алгоритму, представленному на рис. 2.

Разработка методики оптимизации параметров экскаватора при проектировании

На основе системного подхода была разработана математическая модель оптимизации (ММО) параметров карьерного одноковшового экскаватора, где в качестве критерия оптимизации использовались обобщенные оценки технического уровня, а в качестве оптимизируемых параметров – его единичные показатели.

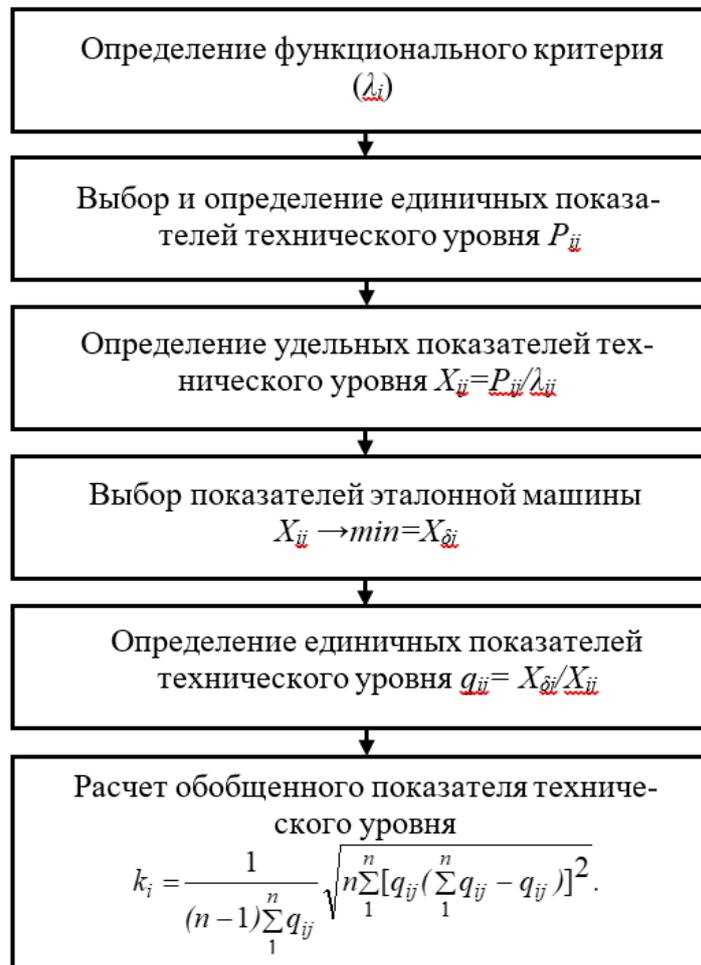


Рис. 2. Алгоритм расчета обобщенного показателя качества экскаваторов
Fig. 2. The calculation algorithm of excavator composite quality indicator

$$\left\{ \begin{array}{l} k = a_0 + a_1 k_m + a_2 N_{np}^y + a_3 \lambda + a_4 T_p \rightarrow \max \\ a_{10} + a_{11} k_m + a_{12} N_{np}^y + a_{13} \lambda + a_{14} T_p \leq K_n^0 + S_0^{Kn} \\ a_{10} + a_{11} k_m + a_{12} N_{np}^y + a_{13} \lambda + a_{14} T_p \geq K_n^0 - S_0^{Kn} \\ a_{20} + a_{21} k_m + a_{22} N_{np}^y + a_{23} \lambda + a_{24} T_p \leq K_m^0 + S_0^{Km} \\ a_{20} + a_{21} k_m + a_{22} N_{np}^y + a_{23} \lambda + a_{24} T_p \geq K_m^0 - S_0^{Km} \\ a_{30} + a_{31} k_m + a_{32} N_{np}^y + a_{33} \lambda + a_{34} T_p \leq K_s^0 + S_0^{Ks} \\ a_{30} + a_{31} k_m + a_{32} N_{np}^y + a_{33} \lambda + a_{34} T_p \geq K_s^0 - S_0^{Ks} \\ \lambda_{max} \geq \lambda \geq \lambda_{min} \\ k_m \geq 0; N_{np}^y \geq 0; \lambda \geq 0; T_p \geq 0 \end{array} \right. \quad (8)$$

где k – обобщенный показатель технического уровня (критерий оптимизации); T_p – ресурс экскаватора, ч; k_m – металлоемкость экскаватора, т/м³; λ – функциональный критерий качества карьерных одноковшовых экскаваторов, кДж/ч; N_{np}^y – удельная мощность привода, кВт/м³; K_m^0, K_s^0, K_n^0 – регламентированные значения ограничений по удельной массе, удельному расходу энергии и показателю производительности; $S_0^{Kn}, S_0^{Ks}, S_0^{Km}$ – значения стандартных отклонений при нахождении регрессионной зависимости

выходных эксплуатационных показателей от оптимизируемых параметров.

Константы моделей целевой функции и ограничений устанавливаются в результате реализации математического эксперимента, под которым в данном случае понимается расчет обобщенного показателя технического уровня и выходных эксплуатационных показателей (K_m^0, K_s^0, K_n^0) при определенных сочетаниях переменных согласно матрице планирования эксперимента.

После оптимизации комплексных показателей качества можно синтезировать основные параметры технической характеристики карьерных экскаваторов.

Разработка программного комплекса

Как показал анализ, в настоящее время практически отсутствуют программные средства, позволяющие осуществлять подбор экскаваторов для условий эксплуатации конкретного горного предприятия, а также электронные каталоги карьерной техники, позволяющие сравнивать параметры экскаваторов между собой.

Разработанный на основе методики оценки качества функционирования экскаватора

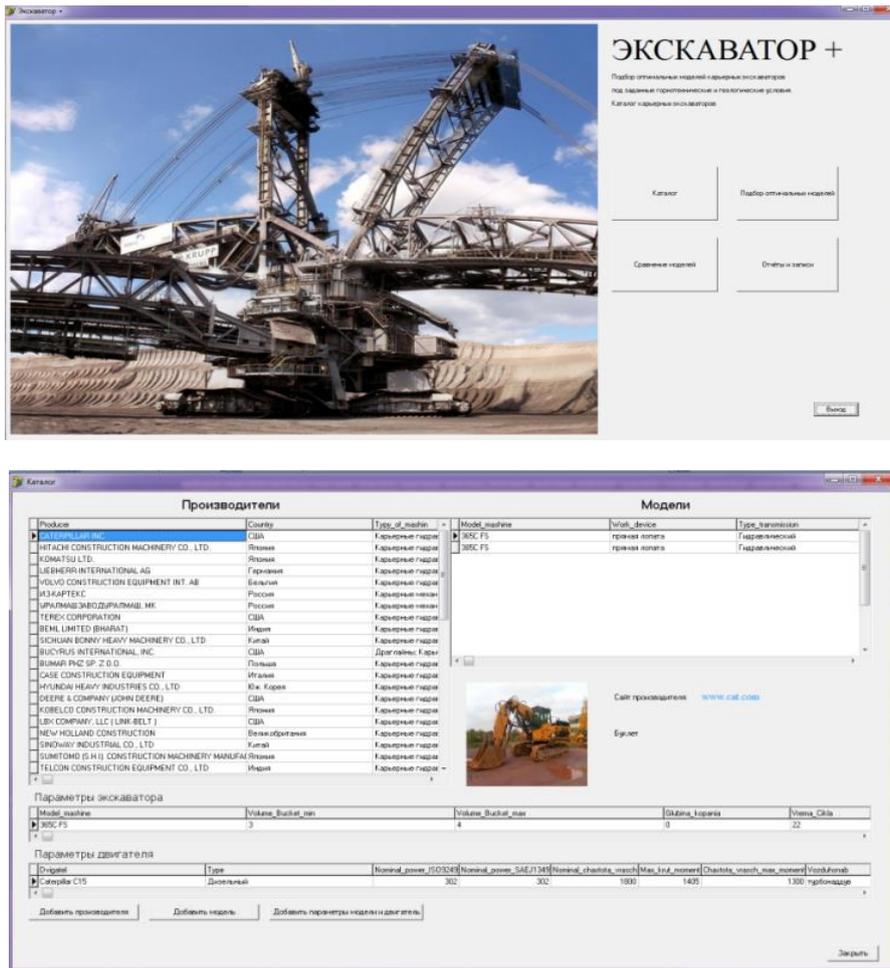


Рис. 3. Интерфейс программы
 Fig. 3. Program interface

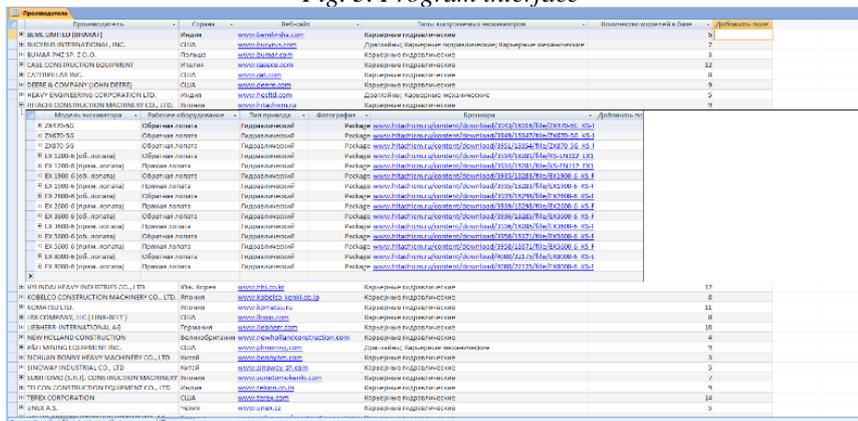


Рис. 4. База данных карьерных экскаваторов
 Fig. 4. Data base of open-pit excavators

программный комплекс включает в себя функции электронного каталога экскаваторов, базу данных карьерных экскаваторов, куда входят модели ведущих мировых производителей [9, 11-12], а также подпрограммы, позволяющие сравнивать характеристики машин, отображать графические результаты расчетов и др.

Интерфейс главного окна программы представляет собой форму для введения исходных

данных, вывода результатов расчета, просмотра данных по основным моделям существующих экскаваторов (рис. 3-4).

Предложенная программа оптимального выбора модели карьерного одноковшового экскаватора под заданные горно-геологические и технические условия позволяет производить научно обоснованный выбор экскаваторов, обладающих оптимальными для заданных условий

ТАБЛИЦА 1. Обобщенный показатель технического уровня карьерных экскаваторов
 Table 1. Composite indicator of open-pit excavators engineering level

Модель экскаватора	385C FS	ЭГ-150	365C FS	EX1200	EX1900	R994 Litronic	PC1250-7	R984 Litronic
Функциональный критерий, кДж/ч	23,04	24,22	22,69	22,46	22,30	21,93	21,57	20,88
Обобщенный показатель качества	0,913	0,894	0,877	0,850	0,830	0,816	0,815	0,769
Модель экскаватора	ЭГ-550	RH 40-E	PC300 0-6	ЭГ-350	PC4000	PC8000-6	RH 90-C	RH 120-E
Функциональный критерий, кДж/ч	22,54	20,65	20,88	22,07	21,24	20,75	20,75	20,63
Обобщенный показатель качества	0,768	0,766	0,759	0,757	0,751	0,738	0,738	0,738
Модель экскаватора	R996 Litronic	RH 400	EX550 0	R995 Litronic	EX360 0	ЭГ-110	RH 200-E	ЭГ-5,5
Функциональный критерий, кДж/ч	21,54	21,68	21,24	20,68	20,47	21,50	19,85	19,58
Обобщенный показатель качества	0,736	0,730	0,728	0,708	0,704	0,700	0,647	0,616

параметрами. Программа может быть использована горными предприятиями как основа для выбора наиболее подходящих для своих условий моделей. Выбор оптимальной модели экскаватора позволит снизить затраты, которые возникают в связи со снижением производительности машины при необоснованном ее выборе.

Обсуждение

Комплексная оценка технического уровня существующего парка карьерных гидравлических экскаваторов

На основании разработанных методик с помощью программного комплекса была проведена комплексная оценка технического уровня существующего парка карьерных гидравлических экскаваторов типа «прямая лопата» по предложенной номенклатуре единичных показателей с использованием специфического для карьерных экскаваторов функционального критерия.

Оценка технического уровня проводилась при следующих условиях. Из всего многообразия моделей и модификаций карьерных экскаваторов были выбраны машины всех типоразмеров вместимостью ковша от 5,2 до 45 м³. Практически все из рассматриваемых экскаваторов выпускаются серийно, однако некоторые модели сняты с производства, но также включены в число оцениваемых машин для того, чтобы как можно более полно учесть опыт проектирования карьерной экскаваторной техники в прошлом.

Для сравнения технического уровня экскаваторов отечественного производства (компания ОМЗ) с зарубежной техникой были рассмотрены достаточно отработанные и широко используемые в мире конструкции карьерных экскаваторов лидирующих в этой области фирм: американской «Caterpillar», японских «Komatsu»,

«Hitachi», немецкой «Liebherr» и швейцарской «Terex O&K».

Общий анализ результатов расчета обобщенного показателя технического уровня карьерных гидравлических экскаваторов показывает, что у всех машин он выше значения 0,5. Это свидетельствует о достаточно высоком техническом уровне экскаваторов. Средний технический уровень рассматриваемой группы экскаваторов составляет $V_{cp} = 0,764$.

Из табл. 1 видно, что более высокие позиции в ранжированном списке занимают экскаваторы с небольшой вместимостью ковша. Это можно объяснить тем, что при увеличении размеров машины, усложнении ее конструкции во все большей степени начинают проявлять себя масштабный фактор и системные эффекты.

Если рассматривать технический уровень машин зарубежных производителей, то можно выделить компании «Caterpillar» и «Hitachi», у которых он выше среднего значения. Самый низкий показатель у машин производства компании «Terex». Средний уровень отечественных машин несколько ниже, чем у экскаваторов зарубежных компаний. Величина показателя V , выражающего усредненное значение обобщенного показателя технического уровня, для рассмотренных зарубежных машин составляет $V_{заруб} = 0,769$, что на 3% выше, чем для экскаваторов отечественной компании ОМЗ, для которых $V_{отеч} = 0,747$. Однако этот показатель больше, чем у машин компании «Terex», на 3,2%. Это означает, что с точки зрения совершенства конструктивных схем, наличия новых идей и решений экскаваторы российского производства практически не отстают от зарубежных машин. Отметим также, что отечественные экскаваторы ЭГ-150 и ЭГ-550 занимают в ранжированном списке соответственно 2 и 9 места (табл. 1). Однако

Таблица 2. Результаты синтеза оптимальных параметров
 Table 2. The results of optimal parameters synthesis

Параметры	KOMATSU PC-3000-6	Значения оптимальных параметров
Емкость ковша экскаватора (E_k), м ³	15	15
Масса рабочая (G_s), т	253	224,3
Мощность привода (N_{np}), кВт	940	949,5
Расчетная продолжительность цикла (t_u), с	26	23,4
Скорость передвижения (v_s), км/ч	2,4	2,7
Радиус копания наибольший (R_k), м	13,5	14,6
Радиус выгрузки наибольший (R_e), м	10,94	12,4
Высота черпания наибольшая (h_k), м	14,7	15,1
Высота выгрузки наибольшая (h_e), м	10,2	11,1
Наибольшее усилие копания ($P_{кон}$), кН	1100	993,3
Ресурс (T_p), тыс. ч.	90	84,5
Скорость поворота платформы (n), об/мин.	4,6	4,8
Скорость подъема ковша (V_n), м/с	0,78	0,91
<i>Обобщенный показатель технического уровня k</i>	<i>0,759</i>	<i>0,981</i>

остальные модели занимают последние места, что существенно снижает среднее значение этого показателя.

Высокое качество экскаваторов зарубежных производителей достигается за счет прежде всего большого ресурса (свыше 90 тыс. ч), эффективности технического обслуживания и эксплуатации, что в свою очередь является следствием применения современных методов и средств проектирования, широкого использования новейших производственных технологий и конструкционных материалов, современных систем управления и диагностики, последних достижений эргономики и дизайна [6, 13-15].

Основными направлениями повышения технического уровня карьерных гидравлических экскаваторов является повышение удельного усилия копания, снижение удельной металлоемкости и энергоемкости, для отечественных машин – увеличение ресурса и надежности за счет совершенствования конструкции гидропривода, а также расширения номенклатуры выпускаемых гидравлических экскаваторов за счет выпуска больших типоразмеров.

Оптимизация параметров карьерного экскаватора при разработке технического задания на его проектирование

Имея оптимальные значения оптимизированных показателей λ^* , N_{np}^* , k_m^* и T_p^* , а также обобщенного показателя технического уровня k^* , определенные зависимостью (8), можно определить основные параметры технической характеристики карьерных экскаваторов.

Результаты синтеза оптимальных параметров для экскаватора с емкостью ковша 15 м³ и техническая характеристика его аналога представлены в табл. 2.

Заключение

В работе содержится новое решение актуальной научной задачи оптимизации параметров карьерных одноковшовых экскаваторов с целью выбора и создания машин более высокого технического уровня, что имеет существенное значение для развития теории и практики проектирования и эксплуатации горных машин.

Предложенные методики оптимального выбора модели карьерного одноковшового экскаватора и оптимизации его параметров позволят производить научно обоснованный выбор экскаваторов, обладающих оптимальными для заданных условий параметрами, а также дают возможность установить и оптимально согласовать их параметры при заданных технических требованиях на стадии проектирования.

Разработан программный комплекс, основанный на данных методиках и позволяющий производить научно обоснованный выбор экскаваторов, обладающих оптимальными для заданных условий параметрами. Комплекс позволяет упростить и автоматизировать задачу оптимального выбора модели экскаватора под заданные условия эксплуатации.

Проведена комплексная оценка технического уровня существующего парка карьерных гидравлических экскаваторов типа «прямая

лопата» с использованием программного комплекса, произведена оценка технического уровня существующего парка карьерных экскаваторов, выявлены пути повышения технического уровня и способы реализации их на стадии проектирования.

В результате исследования математической модели оптимизации были установлены оптимальные значения комплексных показателей качества, из которых были синтезированы основные параметры технической характеристики карьерных экскаваторов. Для примера были рассмотрены параметры экскаватора KOMATSU

РС-3000-6 и экскаватора с оптимальными параметрами (табл. 2), причем обобщенный показатель качества последнего выше на 30%.

Методики и программный комплекс могут быть использованы горными предприятиями как основа для выбора наиболее подходящих для своих условий моделей машин и разработки технического задания на их проектирование. Выбор оптимальной модели экскаватора позволит снизить затраты, которые возникают в связи со снижением производительности машины при ее необоснованном выборе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Er, S. Assessment of excavatability, abrasivity and slope stability in a sandstone quarry in Istanbul, Turkey / S. Er, M. Yilmaz, A. Ertin, A. Tugrul, N. Tokgöz // J. Geol. Soc. India. – 2017. – Vol. 89, № 5. – P. 581-588.
2. Fiscor, S. Smarter shovels dig and load more efficiently // Eng. and Mining J. – 2009. – Vol. 210, № 3. – P. 44-47.
3. Yan, J. Nonlinear modeling and identification of the electro-hydraulic control system of an excavator arm using BONL model / J. Yan, B. Li, G. Guo, Y. Zeng, M. Zhang // Chin. J. Mech. Eng. – 2013. – Vol. 26, № 6. – P. 1212-1221.
4. Frimpong, S. Dynamic modeling of hydraulic shovel excavators for geomaterials / S. Frimpong, Y. Hu, H. Inyang // Int. J. Geomech. – 2008. – Vol. 8, № 1. – P. 20-29.
5. Awuah-Offei, K. Cable shovel digging optimization for energy efficiency / K. Awuah-Offei, S. Frimpong // Mech. and Mach. Theory. – 2007. – Vol. 42, № 8. – P. 995-1006.
6. Yoshida, T. Examination of effective improvement in digging operation for hydraulic excavators / T. Yoshida, T. Koizumi, N. Tsujiuchi, K. Chen, Y. Nakamoto // Nihon kikai gakkai ronbunshu. C = Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C. – 2012. – Vol. 78, № 789. – P. 1596-1606.
7. Wang, H. Research on control strategy for energy management system of hybrid power excavator / H. Wang, M. Sun, Z. He, S. Huang, F. Rong, X. Yuan // Hunan daxue xuebao. Ziran kexue ban = J. Hunan Univ. Natur. Sci. – 2018. – Vol. 45, № 2. – P. 78-86.
8. Style-choosing calculation and designing of revolving support mechanism of hydraulic excavator / Y.-g. Wang, Q. Fang // Meikuang jixie = Coal Mine Mach. – 2006. – Vol. 27, № 11. – P. 4-6.
9. Abdel-baqi, O. J. Energy Management for an 8000 hp Hybrid Hydraulic Mining Shovel / O. J. Abdel-baqi, A. Nasiri, P. J. Miller // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2016. – Vol. 52, № 6. – P. 5041-5050.
10. Солод, Г.И. Основы квалиметрии. – М.: МГИ, 1991. – 84 с.
11. Mitsuhashi, I. New hydraulic excavator SH200-5 LEGEST / I. Mitsuhashi, H. Tsukamoto, N. Sakai // Sumitomo jukikai giho = Sumitomo Heavy Ind. Techn. Rev. – 2007. – № 165. – P. 7-8.
12. Bilgin, H F. Reactive-power compensation of coal mining excavators by using a new-generation STATCOM / H.F. Bilgin, M. Ermis, K.N. Kose, I. Cadrici, A. Acik, T. Demirci, A. Terciyani, C. Kocak, M. Yorukoglu // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2007. – Vol. 43, № 1. – P. 97-110.
13. Fernandez, J.E. Materials selection to excavator teeth in mining industry / J. E. Fernandez, R. Vijande, R. Tucho, J. Rodriguez, A. Martin // Wear. – 2001. – Vol. 250, № 1-12. – P. 11-18.
14. Dogruoz, C. Effect of cutting tool blunting on the performances of various mechanical excavators used in low- and medium-strength rocks / C. Dogruoz, N. Bolukbasi // Bull. Eng. Geol. and Environ. – 2014. – Vol. 73, № 3. – P. 781-789.
15. Cao, Y. Dynamic modeling of the front structure of an excavator / Y. Cao, Y. Xie // Nonlinear Dyn. – 2018. – Vol. 91, № 1. – P. 233-247.

REFERENCES

1. S. Er, M. Yilmaz, A. Ertin, A. Tugrul, N. Tokgöz // J. Geol. Soc. India. 2017. Vol. 89, 5. P. 581-588.
2. S. Fiscor // Eng. and Mining J. 2009. V. 210, 3. P. 44-47.
3. J. Yan, B. Li, G. Guo, Y. Zeng, M. Zhang // Chin. J. Mech. Eng. 2013. Vol. 26, 6. P. 1212-1221.
4. S. Frimpong, Y. Hu, H. Inyang // Int. J. Geomech. 2008. Vol. 8, 1. P. 20-29.

5. K. Awuah-Offei, S. Frimpong // *Mech. and Mach. Theory*. 2007. Vol. 42, 8. P. 995-1006.
6. T. Yoshida, T. Koizumi, N. Tsujiuchi, K. Chen, Y. Nakamoto // *Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. C*. 2012. Vol. 78, 787. P. 1596-1606.
7. H. Wang, M. Sun, Z. He, S. Huang, F. Rong, X. Yuan // *J. Hunan Univ. Natur. Sci.* 2018. Vol. 45, 2. P. 78-86.
8. Y.-g. Wang, Q. Fang // *Coal Mine Mach.* 2006. Vol. 27, 11. P. 4-6.
9. O. J. Abdel-baqi, A. Nasiri, P. J. Miller // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2016. Vol. 52, 6. P. 5041-5050.
10. G. I. Solod. *Osnovy kvalimetrii*. Moscow: Moscow Gorniy Institut, 1991. 84 pp.
11. I. Mitsuhashi, H. Tsukamoto, N. Sakai // *Sumitomo Heavy Ind. Techn. Rev.* 2007. Vol. 165. P. 7-8.
12. H. F. Bilgin, M. Ermis, K. N. Kose, I. Cadrici, A. Acik, T. Demirci, A. Terciyarli, C. Kocak, M. Yorukoglu // *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2007. Vol. 43, 1. P. 97-110.
13. J. E. Fernandez, R. Vijande, R. Tucho, J. Rodriguez, A. Martin // *Wear*. 2001. Vol. 250, 1-2. P. 11-18.
14. C. Dogruoz, N. Bolukbasi // *Bull. Eng. Geol. and Environ.* 2014. Vol. 73, 3. P. 781-789.
15. Y. Cao, Y. Xie // *Nonlinear Dyn.* 2018. Vol. 91, 1. P. 233-247.

Поступило в редакцию 19.05.2020
Received 19 May 2020