

**Воронов Юрий Евгеньевич**<sup>1</sup>, доктор техн. наук, профессор, **Косолапов Андрей Валентинович**<sup>1</sup>, кандидат техн. наук, **Воронов Артем Юрьевич**<sup>1</sup>, кандидат техн. наук, **Ромашко Владимир Георгиевич**<sup>1</sup>, кандидат техн. наук, **Воронов Антон Юрьевич**<sup>2</sup>,

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

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

E-mail: vyue.ap@kuzstu.ru

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ КАРЬЕРОВ

### *Аннотация:*

**Актуальность работы.** Комплексная оценка технического уровня (качества) механического оборудования карьеров базируется на известной методике безэкспертной оценки качества горных машин, разработанной под руководством Г.И. Солода. Методика, основываясь на фундаментальных принципах квалиметрии, позволяет оценивать функционально-однородные машины разных типоразмеров, типов и конструктивных исполнений на основе функционального критерия машины, определяющего ее основное назначение. Оценка технического уровня горных машин позволяет создать базу для научно-обоснованного выбора приоритетных направлений его повышения и разработки научно-обоснованных методов оптимального их проектирования.

**Цель работы.** Комплексная оценка технического уровня (качества) механического оборудования карьеров для его повышения и оптимизации параметров горных машин.

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

**Результаты.** Разработанная методика комплексной оценки обеспечивает возможность прогнозирования технического уровня и значений основных параметров для проектируемых машин, а также управления качеством машины на всех стадиях ее жизненного цикла – проектирования, изготовления, эксплуатации.

**Ключевые слова:** открытые горные работы; механическое оборудование карьеров; технический уровень и качество машин; методика и комплексная оценка качества

**Информация о статье:** принята 01 октября 2019 г.

DOI: 10.26730/1816-4528-2019-4-26-33

Применительно к механическому оборудованию карьеров (буровым станкам, одноковшовым экскаваторам, карьерным самосвалам) и карьерным экскаваторно-автомобильным комплексам указанная методика была использована в работах [1-5]. Различия в вариантах методики в указанных работах состоят в специфических функциональном критерии и номенклатуре показателей технического уровня, при этом под термином «технический уровень» понимается уровень качества машины на стадии ее проектирования.

Комплексная оценка технического уровня карьерных горных машин включает в себя следующие этапы:

- выбор функционального критерия оценки технического уровня;
- обоснование и определение показателей технического уровня (качества);
- оценка технического уровня (качества) существующих парков карьерных горных машин;
- анализ результатов оценки технического уровня машин и выбор перспективных направлений его повышения.

**Выбор функционального критерия.** Поскольку качество горной машины может проявиться только в процессе выполнения ею своей функции в соответствии с назначением – при бурении скважин в породах, имеющих определенные физико-механические свойства, при экскавации и транспортировании горной массы (вскрышных пород или полезного ископаемого), машину нельзя рассматривать в отрыве от взаимодействующей с ней горной массой. Для такой оценки необходимо иметь функциональный критерий взаимодействия элементов систем «буровой станок – порода», «экскаватор – горная масса», «карьерный самосвал – горная масса – дорога» при ограничениях, накладываемых внешней горной средой.

С точки зрения взаимодействия основным назначением горной машины является обеспечение высокой производительности работ, основным свойством горной массы – способностью сопротивляться бурению, экскавации, перемещению. Параметром машины, в наибольшей степени определяющим эффективность взаимодействия, является ее производительность  $Q$ ; в качестве главного параметра горной массы, в наибольшей степени

характеризующего ее способность сопротивляться выполнению своей основной функции, может быть названа удельная энергия выполнения горной машиной своей основной функции в соответствии с назначением,  $W$ .

Произведение указанных главных параметров для машины и горной массы –

$$\lambda = W \cdot Q \quad (1)$$

и составит функциональный критерий оценки качества карьерных горных машин (кВт).

Удельная энергия выполнения горной машиной своей функции представляет собой минимально необходимые затраты энергии на разрушение и удаление из скважины  $1 \text{ м}^3$  породы (буровые станки), копанье и погрузку  $1 \text{ м}^3$  горной массы за один цикл (экскаваторы), транспортирование 1 тонны горной массы по дороге данного профиля протяженностью 1 км (карьерные самосвалы). Она должна полностью определяться физико-механическими свойствами массива горных пород, горной массы, характеристиками опорной поверхности и не зависеть от типа, модели и конструктивного исполнения машины, поэтому при сравнении между собой горных машин с различной областью рационального использования параметр  $W$  будет играть роль масштабного фактора, который ставит в один ряд станки шнекового и шарошечного бурения, все одноковшовые экскаваторы, карьерные самосвалы (рудовозы, углевозы), позволяя сравнивать их технический уровень и качество.

В зависимости от того, какая производительность будет использована при определении функционального критерия, он может быть использован для оценки технического уровня машин или уровня качества их эксплуатации. Для сравнения существующих карьерных горных машин между собой и при проектировании новой техники при определении функционального критерия (1) следует использовать теоретическую производительность.

**Удельная энергия бурения.** Процесс бурения взрывных скважин на карьерах предполагает выполнение двух взаимосвязанных операций: разрушение породы на забое и удаление продуктов разрушения из скважины, поэтому удельная энергия бурения должна включать в себя две составляющих:  $W = W_r + W_o$ , где  $W_r$ ,  $W_o$  – удельная энергия разрушения породы и удаления ее из скважины, МДж/м<sup>3</sup>. Значения  $W_r$  приводятся в справочной литературе. Зависимость для удельной энергии удаления продуктов разрушения из скважины определена в работе [1] и имеет вид:

$$W_o = 0,5\rho_p g(\text{Cosa} + f_c \text{Sina})L_c,$$

где  $\rho_p$  – плотность буримого массива, т/м<sup>3</sup>;  $g$  – гравитационное ускорение, м/с<sup>2</sup>;  $\alpha$  – угол наклона скважины к вертикали;  $f_c$  – коэффициент трения породы о буровую ствол;  $L_c$  – глубина скважины, м.

**Производительность бурения** может быть определена по формуле:

$$P_T = 0,25\pi D_s^2 \vartheta_T,$$

где  $\vartheta_T$  – техническая скорость бурения, м/ч.

Техническая скорость  $\vartheta_T$  определяется механической (теоретической) скоростью бурения  $\vartheta_M$  и

удельными затратами времени на вспомогательные операции  $t_v$ . Формулы для определения технической скорости бурения и ее составляющих приведены в технической информации или монографии [1] и имеют следующий вид:

$$\vartheta_T = \frac{60}{1/\vartheta_M + t_v}; \quad \vartheta_M = \frac{60N_{vr}\eta_{mex}}{400D_c^2\sigma_{mb}} (\text{м/мин}); \quad t_v = 0,780 + \frac{3}{\vartheta_{man}} + 0,0213k_c - 0,000374k_c^2 (\text{мин/м}),$$

где  $N_{vr}$  – мощность вращателя, кВт;  $D_c$  – диаметр скважины, м;  $\vartheta_{man}$  – скорость спускоподъемных (маневровых) операций, м/мин;  $k_c = L_c/l_n$  – коэффициент совершенства механизма подачи;  $l_n$  – ход непрерывной подачи става на забой, м;  $\eta_{mex} = 0,65$  – механический КПД вращателя;  $\sigma_{mb}$  – предел прочности породы при механическом способе бурения, МПа.

**Удельная энергия экскавации горной массы** определяется как работа, производимая экскаватором за один цикл, равная сумме работ, затрачиваемых на копанье горной массы и на ее погрузку в автосамосвал, в расчете на  $1 \text{ м}^3$  емкости ковша экскаватора, что исключает влияние его конструкции и параметров. Зависимость для определения удельной энергии экскавации определена в работе [2] и имеет вид (кДж/м<sup>3</sup>):

$$W = k_f + 0,5\rho_p g(h_k + \frac{\pi n^2 R_v^2}{225g}),$$

где  $k_f$  – удельное сопротивление породы копанью, кПа;  $h_k$  – наибольшая высота копанья экскаватора, м;  $n$  – частота вращения поворотной платформы, мин<sup>-1</sup>;  $R_v$  – радиус выгрузки, м.

**Производительность экскаватора** в расчете на  $1 \text{ м}^3$  вместимости ковша может быть определена по известной формуле (м<sup>3</sup>/ч·м<sup>3</sup>):

$$P_T = 3600/t_c,$$

где  $t_c$  – расчетная продолжительность рабочего цикла, с. Приводится в технической характеристике одноковшовых экскаваторов, например, [6-8].

**Удельная энергия транспортирования горной массы** определяется как работа транспортирования в расчете на 1 т·км. Работа, необходимая для перемещения горной массы определенного веса и объема по дороге данного профиля и состояния на определенное расстояние, в общем случае будет равна разности работ, затрачиваемых автосамосвалом на движение с грузом и на движение порожнего автомобиля. Эта работа совершается за счет силы тяги самосвала и направлена на преодоление сил сопротивления движению. Сила тяги, которую может реализовать автомобиль, определяется характеристиками его двигателя и трансмиссии и не зависит от наличия или отсутствия в кузове груза. Сила сопротивления движению автосамосвала прямо зависит от его загрузки. Зависимость для определения удельной энергии транспортирования определена в работе [4] и имеет вид (МДж/т·км):

$$W = \frac{g[f_c + i_{max}(2k_T + 1)]}{\sqrt{1 + i_{max}^2}},$$

где  $i_{max}$  – максимальный уклон преодолеваемого самосвалом подъема;  $f_c$  – коэффициент сопротивления качению самосвала по дороге;  $k_T$  – коэффициент тары самосвала.

Производительность самосвала определится как произведение его грузоподъемности  $m_{gr}$  и среднетехнической скорости его движения по маршруту  $\vartheta_{sr.t}$  в расчете на 1 авто-тонну [4]. Она имеет следующий вид (кВт/кН):

$$P_T = 0,56 \frac{N_{dv}}{m_{gr}} \cdot \frac{\sqrt{1+i_{max}^2}}{g[l_{i_{max}}+f_c(2k_T+1)]},$$

где  $N_{dv}$  – мощность двигателя самосвала, кВт.

Подставив соответствующие зависимости для удельной энергии и производительности в зависимость (1), получаем выражение для функционального критерия каждой горной машины. Полученные функциональные критерии позволяют количественно оценить выполнение карьерными горными машинами своих функций и могут быть использованы при комплексной оценке их технического уровня.

Обоснование и определение показателей технического уровня карьерных горных машин. Показатели, характеризующие технический уровень машины, устанавливаются в результате детального анализа технологического процесса данной машины, в течение которого она выполняет определенные операции. Подробно проанализировав каждую из операций, можно сделать вывод о том, какими показателями характеризуется процесс. В результате количество таких показателей первоначально может достигать 20 и больше, поэтому исходная номенклатура показателей всегда подвергается постепенному сокращению по критериям согласованности (зависимости друг от друга), представительности (существенности), подчиненности цели оценки качества, выраженной в виде функционального критерия. В результате проведения таких операций остается, как правило, не более 10 основных показателей технического уровня каждой машины.

Для буровых станков в качестве единичных показателей технического уровня приняты: мощности, затрачиваемые на разрушение забоя  $N_r$  и очистку скважины  $N_{tr}$ ; показатель массы (общей материалоемкости) станка  $M$ ; сравнительная материалоемкость станка (коэффициент массы)  $m_c$ , полной глубины бурения  $L_c$  и глубины бурения за один проход  $l_{pr}$ ; скорости маневровых операций  $\vartheta_{man}$  и передвижения  $\vartheta_{per}$ ; коэффициент технического использования станка  $k_{ti}$ ; коэффициент уровня механизации вспомогательных операций  $k_{ym}$ .

Для одноковшовых экскаваторов характерными показателями технического уровня в работе [2] установлены: удельные энергоемкость  $E_u$  и металлоемкость  $k_M$  машины; удельное усилие копания  $k_f^e$ ; удельные рабочие размеры экскаватора  $k_r^{hk}$  и  $k_r^{Rk}$ , определяющие высоту и ширину забоя; установленный ресурс экскаватора  $T_r$ , как интегральный показатель надежности.

Для карьерных самосвалов характерные единичные показатели [4]: удельная грузоподъемность самосвала  $m_{gr}^{yd}$ ; плотность его компоновки  $\rho_k$ ; коэффициент массы самосвала  $k_M$ ; запас хода по топливу  $L_x$ ; приведенный радиус поворота  $R_{pr}$ ;

максимальная скорость движения автосамосвала  $\vartheta_{max}$ ; нормативный пробег самосвала  $T_r$ .

Все указанные показатели доступны для определения на самых ранних стадиях проектирования машины. В зависимости от более конкретных условий и требований возможно введение дополнительных показателей. Комплексная оценка технического уровня осуществляется по единичным  $q_{ij}$  и суммирующему их обобщенному  $k_i$  показателям, вычисляемым по формулам методики Г.И. Солода [9].

Таким образом, базой для научно-обоснованного выбора приоритетных направлений повышения технического уровня карьерных горных машин является специфический для каждого вида машин функциональный критерий, а также специфический комплекс показателей, выбираемых в зависимости от степени их влияния на производительность соответствующей машины.

Оценка технического уровня существующих парков карьерных горных машин производится при следующих условиях. Из общего количества моделей выделяются машины, получившие широкое распространение на карьерах. Одни из них выпускаются серийно, другие по тем или иным причинам сняты с производства, но до сих пор широко представлены на открытых разработках. Включение их в число оцениваемых обусловлено необходимостью как можно более полно учесть опыт производства и эксплуатации карьерной техники. Наконец, для сравнения технического уровня отечественных карьерных горных машин с зарубежными к рассмотрению принимались достаточно отработанные и широко используемые в мире конструкции лидирующих в области производства соответствующих машин фирм.

В группе буровых машин в общей сложности рассматривалось 15 моделей буровых станков, из них 10 отечественных моделей, и 5 моделей станков фирмы «Vicusgus-Egie». Они охватывают диапазон буримых скважин от 125 до 381 мм по диаметру и от 24 до 60 м по глубине.

Для оценки технического уровня одноковшовых карьерных экскаваторов было отобрано 24 машины всех типоразмеров с вместимостью ковша от 5,2 м<sup>3</sup> до 45 м<sup>3</sup>, из них 5 гидравлических экскаваторов производства ОМЗ «Объединенные машиностроительные заводы» с объемом ковша от 5,5 м<sup>3</sup> до 22 м<sup>3</sup>, а также 19 машин зарубежных фирм: американской «Caterpillar», японских «Komatsu», «Hitachi», немецкой «Liebherr» и швейцарской «Terex O&K» с объемом ковша от 4 м<sup>3</sup> до 45 м<sup>3</sup>.

Среди карьерных автосамосвалов рассматривалось в общей сложности 22 модели. Это 14 моделей и модификаций самосвалов БелАЗ грузоподъемностью от 30 до 320 т, 6 моделей автосамосвалов фирмы «Caterpillar» грузоподъемностью от 36,3 т до 218 т и по одной модели самосвалов фирм «Komatsu» (HD-1200, 120 т) и «Unit Rig» (M-200, 181,4 т). Эта группа автосамосвалов охватывает диапазон изменения грузоподъемности от 30 т до 320 т, то есть охватывает весь диапазон грузоподъемностей карьерных самосвалов, выпускающихся в мире.

Анализ результатов оценки технического уровня карьерных горных машин. Общий анализ результатов расчета обобщенного показателя технического уровня буровых станков показывает, что только у пяти станков он выше 0,5, причем четыре из них – зарубежные. Все это свидетельствует об общем низком техническом уровне парка отечественных карьерных буровых станков. Технический уровень  $k$  рассмотренных станков фирмы «Vucugus-Egie» почти в 2 раза выше, чем технический уровень отечественных.

Отечественные станки уступают зарубежным практически по всем единичным показателям и особенно по показателям, характеризующим качество выполнения ими вспомогательных операций ( $L_c, l_{pr}, \vartheta_{man}, \vartheta_{per}$ ), уровень механизации ( $k_{ym}$ ) и надежность ( $k_{ti}$ ). Конкуренцию отечественные станки смогли составить лишь старейшему буровому станку фирмы «Vucugus-Egie», который выпускался с 1966 по 1975 гг. [10].

Одной из главных причин такого состояния следует считать отсутствие комплексного подхода к назначению основных параметров при проектировании, в результате между параметрами бурового станка наблюдается несбалансированность, когда достаточно эффективное выполнение основных операций сводится на нет крайне неэффективным выполнением вспомогательных операций. В итоге, несмотря на большую весомость показателей, характеризующих качество выполнения основных операций, технический уровень отечественных станков остается низким. Единичные показатели технического уровня зарубежных станков незначительно отличаются друг от друга (разброс около среднего значения составляет 18%), что свидетельствует о сбалансированности параметров. В то же время у отечественных станков этот разброс превышает 50%. Таким образом, налицо еще одно подтверждение необходимости комплексного подхода к вопросам проектирования буровых станков.

Несколько иная ситуация с одноковшовыми экскаваторами. 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 данных машин. Средний технический уровень рассматриваемой группы экскаваторов составляет  $k = 0,764$ .

Выясняется также, что более высокие позиции в ранжированном списке занимают экскаваторы с небольшой вместимостью ковша. Это можно объяснить все большим проявлением масштабного фактора и системных эффектов при увеличении размеров машины, усложнении ее конструкции. Изменение масштаба (размеров машины) в соответствии с системным подходом требует согласования с внешней средой, то есть должно сопровождаться либо изменением параметров взаимодействующих с машиной объектов, либо качественными изменениями в самой машине, однако принятый разработчиками эмпиризм при проектировании не дает серьезных качественных изменений. При увеличении размеров

карьерных экскаваторов необходимо использовать новые конструкционные материалы и производственные технологии, а также оптимально сбалансировать основные параметры.

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 немного ниже, чем у зарубежных компаний (на 3%).

Общий анализ результатов расчета обобщенного показателя технического уровня карьерных самосвалов, как и в случае с экскаваторами, показывает, что у всех машин он выше значения 0,5. Это также свидетельствует о достаточно высоком общем техническом уровне карьерных автосамосвалов. Средний технический уровень рассматриваемой группы машин составляет 0,695. Как и у экскаваторов, технический уровень автосамосвалов БелАЗ и машин зарубежных фирм практически одинаков. Это означает, что с точки зрения совершенства конструктивных схем, наличия новых идей и решений автосамосвалы Белорусского автозавода практически не отличаются от зарубежных машин (это касается и одноковшовых экскаваторов).

Авторитет ведущих зарубежных фирм у потребителей карьерных горных машин в целом достигается прежде всего за счет более высокой надежности и долговечности, эффективности технического обслуживания и эксплуатации, что в свою очередь является следствием применения современных методов и средств автоматического проектирования, широкого использования эффективных конструктивных материалов, новейших производственных технологий, современных систем управления и диагностики, последних достижений эргономики и дизайна.

#### Определение основных направлений повышения технического уровня карьерных горных машин.

Анализ единичного показателя технического уровня буровых станков  $q_1(N_r)$ , характеризующего рациональность использования мощности, затрачиваемой на разрушение, показывает, что у восьми из десяти отечественных буровых станков с этим параметром все благополучно. Недостаточно эффективно используется эта мощность лишь у двух шнековых станков – СВБ-2М и 2СБР-125-30. Это значит, что при такой энерговооруженности эти станки должны либо иметь большую производительность, либо для обеспечения той же производительности должны затрачивать на разрушение меньшую мощность. Общий технический уровень по этому показателю у группы отечественных станков составляет 0,655, в то время как в группе зарубежных станков этот показатель приближается к единице, составив 0,961.

Из значений единичного показателя  $q_2(N_{tr})$ , отражающего эффективность использования мощности, затрачиваемой на очистку скважины, видно, что высокие значения этого показателя имеют шнековые станки, а гораздо меньшие значения имеют станки шарошечного бурения, у которых очистка скважины осуществляется продувкой сжатым

воздухом. Это говорит об очень высокой энергоемкости транспортирования продуктов разрушения из скважины сжатым воздухом и, следовательно, о неэкономичности использования продувки как способа очистки скважин. Поэтому в снижении расхода воздуха на очистку, а значит, и в уменьшении мощности, затрачиваемой на удаление продуктов разрушения из скважины, кроется значительный резерв повышения технического уровня буровых станков. Это еще раз подтверждает необходимость перехода на шнекопневматический способ очистки, позволяющий снизить расход воздуха по сравнению с продувкой на 35-40% [11].

Анализ значений единичного показателя  $q_3(M)$ , характеризующего соответствие массы бурового станка и осевого усилия, развиваемого системой подачи, показывает, что это соответствие выдержано близко к идеальному лишь у двух станков. Это старые модели отечественных станков СВБ-2М и 2СБШ-200Н-40 (показатели соответственно 1,0 и 0,918). Все остальные отечественные и зарубежные станки имеют значительно более низкие значения этого показателя. Это значит, что большинство станков излишне тяжелые, причем отечественные станки в этом смысле даже немного выигрывают. Это единственный показатель, по которому отечественные станки хоть и не намного, но превосходят зарубежные. Следует также отметить, что станки с нижним расположением вращателя и патронной схемой подачи имеют большие значения показателя  $q_3(M)$  по сравнению со станками с подвижным вращателем. Эти станки могут реализовать одно и то же осевое усилие при меньшей массе, и в этом смысле патронная схема подачи и нижнее расположение вращателя лучше, чем шпиндельная схема подачи с подвижным вращателем.

Анализ единичного показателя  $q_4(m_c)$ , характеризующего соотношение фактической массы бурового станка и типовой массы, рассчитанной для большой группы буровых станков отечественного и зарубежного производства, подтверждает вывод о том, что большинство буровых станков являются излишне тяжелыми.

Из анализа единичных показателей  $q_5(L_c)$ ,  $q_6(l_{pr})$ ,  $q_7(\vartheta_{man})$ ,  $q_8(\vartheta_{per})$ , характеризующих качество выполнения вспомогательных операций, однозначно следует, что отечественные станки значительно уступают зарубежным. Это говорит, во-первых, о низком уровне решения задач механизации вспомогательных операций, а во-вторых, о несбалансированности параметров буровых станков, что свидетельствует об отсутствии системности при их создании. У отечественных станков более чем в два раза ниже уровень механизации вспомогательных операций  $q_9(k_{ym})$  и почти в два раза меньше надежность отечественных буровых станков по сравнению с зарубежными  $q_{10}(k_{ti})$ . Все это говорит о необходимости проведения широкомасштабных работ и по этому вопросу.

Анализ результатов расчета единичных показателей позволяет установить основные резервы повышения технического уровня карьерных гидравлических экскаваторов. Это увеличение удельного

усилия копания, удельного наибольшего радиуса копания, а также снижение удельной металлоемкости и удельной энергоемкости. Для отечественных экскаваторов основным резервом является повышение ресурса. Повышение удельного усилия копания возможно за счет улучшения геометрии рабочего органа, кинематики движения рабочего оборудования, увеличения КПД привода. Повышение удельного радиуса копания снижает передвижки экскаватора при работе, что в свою очередь увеличивает его производительность, однако чрезмерное его увеличение ведет к повышенным нагрузкам и, как следствие снижению ресурса. Сбалансированность параметров зарубежных машин в среднем немного выше, чем отечественных (32,6% против 34,9%).

Анализ технического уровня по единичным показателям карьерных самосвалов показывает, что самосвалы БелАЗ опережают зарубежные машины по четырем из семи показателей, а именно по удельной грузоподъемности, плотности компоновки, сравнительной материалоемкости (коэффициенту массы) и по приведенному радиусу поворота; отстают они по запасу хода по топливу, максимальной скорости движения и особенно по надежности (ресурсному пробегу).

Анализ единичного показателя  $q_1(m_{gr}^{ud})$ , характеризующего приспособленность автосамосвала к транспортированию грузов определенной насыпной массы, показывает, что, во-первых, и самосвалы БелАЗ, и зарубежные машины имеют очень высокие значения этого показателя; во-вторых, самосвалы БелАЗ по этому показателю несколько превосходят машины зарубежных фирм (на 6,4%). Так как все рассматриваемые автосамосвалы – рудовозы, то машины БелАЗ более приспособлены к перевозке тяжелых пород и руд, чем зарубежные. Это, очевидно, предусматривалось уже при проектировании, поскольку породные условия карьеров России и стран бывшего СССР, для которых они были главным образом предназначены, как правило, более тяжелые, чем на карьерах за рубежом.

Вторым показателем, по которому все автосамосвалы (и отечественные, и зарубежные) имеют высокие значения, является единичный показатель  $q_2(\rho_k)$ , отражающий плотность компоновки (компактность) самосвала и эффективность использования этого параметра. Общий технический уровень по этому показателю у самосвалов БелАЗ на 11,2% выше, чем у зарубежных машин. Это, как и в предыдущем случае, означает, во-первых, то, что компоновка и отечественных, и зарубежных машин достаточно рациональна; во-вторых, зарубежные автосамосвалы имеют несколько более «рыхлую» компоновку по сравнению с самосвалами БелАЗ. В-третьих, вопреки ожиданиям, значения показателя практически не зависят от типа трансмиссии, примененной на автомобиле, хотя, казалось бы, у самосвалов с электрической трансмиссией показатель плотности компоновки должен быть выше.

Анализ единичного показателя  $q_3(k_M)$ , отражающего соотношение фактической массы автосамосвала и типовой массы, характеризующего эффективность использования этой массы при работе

самосвала, свидетельствует прежде всего о необходимости снижения их собственной массы, причем по этому показателю, как и по двум предыдущим, машины БелАЗ несколько выигрывают (на 9,8%).

Последним показателем, по которому автосамосвалы БелАЗ превосходят зарубежные, является показатель  $q_6(R_{pr})$ , отражающий соотношение минимального радиуса поворота и базы самосвала и характеризующий эффективность использования маневренности машины. Это соотношение характеризует также и рациональность компоновки автосамосвала, по которому, как уже говорилось, самосвалы Белорусского завода несколько превосходят зарубежные (на 8,7%).

Анализ единичного показателя  $q_4(L_x)$ , характеризующего эффективность использования автономности хода, показывает некоторое отставание автосамосвалов БелАЗ от зарубежных машин. Это свидетельствует, по-видимому, о том, что самосвалы БелАЗ имеют менее экономичные двигатели в сочетании с меньшими объемами топливных баков. При работе в карьере, когда среднесуточный пробег превышает запас хода по топливу, это приведет к необходимости дозаправки, а значит, к дополнительным потерям времени и, как следствие, к снижению эксплуатационной производительности.

Еще большее отставание у самосвалов БелАЗ от зарубежных машин по показателю  $q_5(v_{max})$ , характеризующему динамические свойства автосамосвалов. Отечественные самосвалы на 8,7% менее мобильны по сравнению с зарубежными машинами даже при большей энерговооруженности. Это можно объяснить, очевидно, менее качественным изготовлением деталей трансмиссии, что приводит к снижению ее КПД и потерям мощности при передаче от первичного двигателя к ведущим колесам.

Однако наиболее значительное отставание автосамосвалов БелАЗ от машин зарубежного производства имеет место по показателю  $q_7(T_r)$ , характеризующему надежность и долговечность самосвала. Автосамосвалы БелАЗ являются в среднем на 27,5% менее долговечными, чем зарубежные машины. Это объясняется более высоким качеством изготовления зарубежных самосвалов, а также более высокими требованиями к надежности техники за рубежом.

Общий анализ результатов расчета единичных показателей карьерных самосвалов показывает, что преобладающее влияние на их величину оказывает функциональный критерий, который, в свою очередь, во многом определяется соотношением мощности двигателя самосвала и его грузоподъемности. Чем выше это соотношение, тем большую величину имеет функциональный критерий и тем выше значение соответствующего единичного показателя. Это означает, в конечном счете, что технически более совершенными оказываются те модели карьерных автосамосвалов, которые обладают большей энерговооруженностью. На необходимость повышения энерговооруженности автосамосвалов уже неоднократно указывалось специалистами [12, 13]. Однако какой конкретно должна быть величина показателя энерговооруженности, чтобы технический уровень самосвала был наивысшим, неизвестно, и

установить его здесь не представляется возможным. Она, очевидно, может быть определена в результате оптимизации параметров машины.

Анализ показал также, что более высокие позиции в ранжированном списке занимают, как правило, автосамосвалы небольшой грузоподъемности, и более низкие – большегрузные машины. Причиной этого является опять же более высокое значение энерговооруженности. Необходимо отметить, что из двух модификаций автосамосвалов одной и той же модели (то есть имеющих одну и ту же грузоподъемность) по обобщенному показателю технического уровня лучше та, которая обладает большей энерговооруженностью и меньшей собственной массой (меньшим коэффициентом тары). Аналогичная ситуация имеет место и у одноковшовых экскаваторов.

То, что машины большего типоразмера (большей грузоподъемности, большей вместимости ковша), несмотря на исключение прямого влияния типоразмера при определении технического уровня, имеют все-таки меньшие значения обобщенного показателя, чем машины малых типоразмеров, можно объяснить еще и тем, что техническая политика при создании новых машин все большего типоразмера, направленная на дальнейшую модернизацию уже имеющихся конструкций без существенных изменений, себя изжила. Как справедливо указывается в работах [14–16], нельзя бесконечно увеличивать размеры машины без изменения компоновки, применения новых конструктивных материалов, нового согласования параметров. Эволюционный путь развития карьерной горной техники, принятый ее разработчиками, а также эмпиризм при проектировании также не даст серьезных качественных изменений в будущем. Как показывает анализ, должны применяться новые подходы к проектированию машин, использоваться новые конструктивные материалы, должна быть повышена надежность, сбалансированы параметры.

Таким образом, базой для научно обоснованного выбора приоритетных направлений повышения технического уровня карьерных горных машин является специфический для каждого вида машин функциональный критерий, а также специфический комплекс показателей, выбираемых в зависимости от степени их влияния на производительность соответствующей машины.

Анализ технического уровня карьерных горных машин позволяет сделать вывод о том, что его повышение может быть достигнуто за счет разработки научно-обоснованных методов оптимального проектирования, которые позволяют определить и оптимально сбалансировать их параметры. Для буровых станков серьезным средством повышения технического уровня дополнительно является также использование на вновь проектируемых машинах пневматического способа очистки скважин.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воронов, Ю.Е. Оптимальное проектирование карьерных горных машин. – М.: Инновационное машиностроение, 2015. – 351 с.

2. Зыков, П.А. Повышение технического уровня карьерных одноковшовых гидравлических экскаваторов на стадии проектирования : дис. ... канд. техн. наук. – КузГТУ, Кемерово, 2013.

3. Буянкин, А.В. Комплексная оценка и прогнозирование показателей качества эксплуатации карьерных автосамосвалов : дис. ... канд. техн. наук. – КузГТУ, Кемерово, 2004.

4. Басманов, С.В. Оптимизация параметров карьерных автосамосвалов для повышения их технического уровня : дис. ... канд. техн. наук. – КузГТУ, Кемерово, 2012.

5. Voronov, Y. Functional quality criterion of rock handling mechanization at open-pit mines / Y. Voronov, A. Voronov // The 11<sup>th</sup> International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment), Kemerovo, Russian Federation, November 20-22, 2017. – E3S Web of Conferences, Volume 21.

6. Зарубежные карьерные гусеничные одноковшовые гидравлические экскаваторы. – Режим доступа: <http://www.spec-technika.ru/?page=issue&pid=100775&sub=100005&item=> – [22.02.2019].

7. Модельный ряд ОМЗ (Группа Уралмаш-Ижора). – Режим доступа: [http://exkavator.ru/excavatoria/producers/omz\\_iz-karteks](http://exkavator.ru/excavatoria/producers/omz_iz-karteks) – [22.02.2019].

8. Новости горной и карьерной техники. – Режим доступа: [http://maxi-exkavator.ru/news/inf\\_news/~id=541](http://maxi-exkavator.ru/news/inf_news/~id=541) – [22.02.2019].

9. Солод, Г.И. Основы квалиметрии. – М.: Изд-во Московского горн. ин-та, 1991. – 84 с.

10. Шестимирова, В. И. Состояние и тенденции развития станков шарошечного бурения : обзор / В.И. Шестимирова, В.И. Антошенко // ЦНИИТЭИтяжмаш. – М., 1989. – 36 с.

11. Воронов, Ю.Е. Установление рациональных режимов очистки скважин при шарошечном бурении в закарстованных массивах : дис. ... канд. техн. наук. – КузПИ, Кемерово, 1984.

12. Тарасов, П.И. Пути экономии дизельного топлива на карьерном автотранспорте // Горный журнал. – 2006. – № 2. – С. 72-75.

13. Егоров, А. Н. Основные направления совершенствования силовых установок карьерных автосамосвалов / А.Н. Егоров, В.Т. Войтов // Горный журнал. – 2003. – № 4-5. – С. 102-106.

14. Кулешов, А.А. Новые конструктивно-компоновочные решения по карьерным автосамосвалам // Горный журнал. – 2000. – № 1. – С. 43-45.

15. Mkhatswa, 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.

16. Lumley, G. Trends in performance of open cut mining equipment // GBI Mining Intelligence white paper. – 2012. – 36 p.

**Yuri E. Voronov**<sup>1</sup>, Dr. Sc. in Engineering, Professor, **Andrey V. Kosolapov**<sup>1</sup>, C. Sc. in Engineering, **Artyom Y. Voronov**<sup>1</sup>, C. Sc. in Engineering, **Vladimir G. Romashko**<sup>1</sup>, C. Sc. in Engineering, **Anton Y. Voronov**<sup>2</sup>,

<sup>1</sup>T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28, Vesennyaya St., Kemerovo, 650000, Russian Federation

<sup>2</sup>АО “УК “Kuzbassrazrezugol”, 4a, avenue Pionersky, Kemerovo, 650054, Russia

## INTEGRATED ASSESSMENT OF THE TECHNICAL LEVEL OF MECHANICAL EQUIPMENT FOR OPEN-PIT MINES

### **Abstract:**

**The urgency of the discussed issue.** Integrated assessment of the technical level (quality) of mechanical equipment for open-pit mines is based on the well-known method of non-expert assessment of the mining machine quality, developed under the guidance of G.I. Solod. The method, based on the fundamental principles of qualimetry, allows us to assess functionally homogeneous machines of various sizes, types and designs based on the functional criterion of the machine determining its main purpose. Assessment of the technical level of mining machines allows creating the basis for the scientifically-based selection of priority directions for its improvement and for the development of scientifically-based methods for optimizing its design.

**The main aim of the study.** Integrated assessment of the technical level (quality) of mechanical equipment for open-pit mines for its enhancement and optimization of the parameters of mining machines.

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

**The results.** The developed method of integrated assessment makes it possible to predict the technical level and the values of the basic parameters for the designed machines, as well as to manage the quality of the machine at all stages of its life cycle – design, manufacture, operation.

**Keywords:** open-pit mining; mechanical equipment for open-pit mines; technical level and quality of machines; methodology and integrated quality assessment

**Article info:** received October 01, 2019

## REFERENCES

1. Voronov Y.E. Optimalnoe proektirovanie gornyh kariernyh mashin [Optimal design of open-pit mining machines]. Moscow: Innovative Engineering, 2015. 351 p. (rus)
2. Zykov P.A. Povyshenie tehniceskogo urovnja kariernyh odnokovshovyh gidravlicheskih ekskavatorov na stadii proektirovaniya [Increasing the technical level of open-pit hydraulic shovels at the design stage]. PhD thesis. Kemerovo: KuzSTU, 2013. (rus)
3. Bujankin A.V. Kompleksnaja otsenka i prognozirovaniye pokazatelej kachestva ekspluatatsii kariernyh avtosamosvalov [Integrated assessment and prediction of indicators of mining truck operation quality]. PhD thesis. Kemerovo: KuzSTU, 2004. (rus)
4. Basmanov S.V. Optimizatsiya parametrov kariernyh avtosamosvalov dlja povysheniya ih tehniceskogo urovnja [Optimization of parameters of mining trucks for increasing its technical level]. PhD thesis. Kemerovo: KuzSTU, 2012. (rus)
5. Voronov Y. Functional quality criterion of rock handling mechanization at open-pit mines / Y. Voronov, A. Voronov // The II<sup>nd</sup> International Innovative Mining Symposium (Devoted to Russian Federation Year of Environment), Kemerovo, Russian Federation, November 20-22, 2017. E3S Web of Conferences, Volume 21.
6. Zarubezhnye kariernye gusenichnye odnokovshovyh gidravlicheskie ekskavatory [Foreign open-pit crawler hydraulic shovels]. Access mode: <http://www.spec-technika.ru/?page=issue&pid=100775&sub=100005&item=>. [22.02.2019] (rus)
7. Modelnyi rjad OMZ (Gruppa Uralmash-Izhora) [The lineup of OMZ (Uralmash-Izhora Group)] Access mode: [http://exkavator.ru/excapedia/producers/omz\\_izkarteks](http://exkavator.ru/excapedia/producers/omz_izkarteks). [22.02.2019] (rus)
8. Novosti gornoj i kariernoj tehniki [News of mining and open-pit equipment]. Access mode: [http://maxi-exkavator.ru/news/inf\\_news/~id=541](http://maxi-exkavator.ru/news/inf_news/~id=541). [22.02.2019] (rus)
9. Solod G.I. Osnovy kvalimetrii [The basics of qualimetry]. Moscow: Moscow Mining Institute, 1991. 84 p. (rus)
10. Shestimirova V.I. Sostojanie i tendentsii razvitija stankov sharoshechnogo burenija : obzor [State of the art and development trends of roller drilling machines: a review] / V.I. Shestimirova, V.I. Antoshenko // CNIITEItjzhmash. – Moscow, 1989. 36 p. (rus)
11. Voronov Y.E. Ustanovlenie ratsionalnyh rezhimov ochistki skvazhin pri shroshechnom burenii v zakarstovannyh massivah [Establishment of rational modes of blast hole cleaning during roller drilling in carstified massifs]. PhD thesis. Kemerovo: KuzPI, 1984. (rus)
12. Tarasov P.I. Puti ekonomii dizelnogo topliva na kariernom avtotransporte [Ways to save diesel fuel on open-pit mining vehicles]. Mining Journal. 2006. № 2. P. 72-75. (rus)
13. Egorov A.N. Osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya silovyh ustanovok kariernyh avtosamosvalov [The main directions of improvement of mining truck engines] / A.N. Egorov, V.T. Voytov // Mining Journal. 2003. № 4-5. P. 102-106. (rus)
14. Kuleshov A.A. Novye konstruktivno-komponovochnye resheniya po kariernym avtosamosvalam [New design and layout solutions for mining trucks] Mining Journal. 2000. № 1. P. 43-45. (rus)
15. Mkhathsha 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.
16. Lumley G. Trends in performance of open cut mining equipment. GBI Mining Intelligence white paper. 2012. 36 p.

**Библиографическое описание статьи**

Воронов Ю.Е., Косолапов А.В., Воронов А.Ю., Ромашко В.Г., Воронов А.Ю. Комплексная оценка технического уровня механического оборудования карьеров // Горное оборудование и электромеханика – 2019. – № 4 (144). – С. 26-33.

**Reference to article**

Voronov Yu.E., Kosolapov A.V., Voronov A.Y., Romashko V.G., Voronov A.Y. Integrated assessment of the technical level of mechanical equipment for open-pit mines. Mining Equipment and Electromechanics, 2019, no. 4 (144), pp. 26-33.