

Эффективность применения экскаваторов на карьерах Узбекистана

О.У. Хамидов, Д.А. Шибанов✉, П.В. Шишкин, В.О. Колпаков

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
✉ shibanov_da@pers.spmi.ru

Резюме: В статье приводится анализ оценки эффективности карьерных экскаваторов на примере горнодобывающих предприятий Республики Узбекистан. В качестве критерия оценки используется показатель целевой производительности, методика определения которой учитывает негативное влияние факторов эксплуатации на величину потерь производительности в базовых условиях эксплуатации. В качестве влияющих факторов рассмотрены климатические факторы, горно-геологические и горнотехнические условия, организация ведения горных работ, качество подготовки забоя и горной массы, эргатический фактор управления, техническое обслуживание и ремонт. Для корректировки величины потерь в заданных условиях эксплуатации введен коэффициент весомости влияющего фактора. Значение коэффициента весомости обосновывается на основе многолетних наблюдений за специфическими особенностями условий и режимов эксплуатации, технического обслуживания и ремонта экскаваторов на карьерах Узбекистана, экспертного мнения и данных открытых источников информации. Построена лучевая диаграмма коэффициента сохранения эффективности экскаватора ЭКГ-20К, как широко используемого в рамках обновления экскаваторного парка предприятий Узбекистана, для наихудшего сценария и для карьеров Кальмакир, Ёшлик и Мурунтау. В результате оценен достижимый уровень целевой производительности ЭКГ-20К для рассмотренных карьеров.

Ключевые слова: карьерный экскаватор, эксплуатация, влияющие факторы, эргатическая система, эргатический фактор управления

Для цитирования: Хамидов О.У., Шибанов Д.А., Шишкин П.В., Колпаков В.О. Эффективность применения экскаваторов на карьерах Узбекистана. *Горная промышленность*. 2024;(5):135–142. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-135-142>

Efficiency of excavators application in open pit mines of Uzbekistan

O.U. Khamidov, D.A. Shibanov✉, P.V. Shishkin, V.O. Kolpakov

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation
✉ shibanov_da@pers.spmi.ru

Abstract: The article analyses efficiency assessment of mining excavators using the case study of mining operations of the Republic of Uzbekistan. The index of target productivity is used as an assessment criterion, which definition methodology takes into account the negative influence of the operation factors on the value of productivity loss in basic operating conditions. Climate, mining and geological and mining engineering conditions, organization of the mining operations, the quality of the face and rock mass preparation, ergative factor of management as well as maintenance and repair are considered as the impact factors. A weighting coefficient of the impact factor is introduced in order to adjust the value of losses in given operating conditions. The value of the weighting coefficient is justified based on long-term observations of specific conditions features and modes of operation, maintenance and repair of excavators in the quarries of Uzbekistan, expert opinion and open source data. A ray-path chart of the efficiency preservation coefficient of the EKG-20K excavator as a widely used excavator within the excavator fleet renewal programme at Uzbekistan enterprises, was plotted for the worst scenario and for the Kalmakir, Yoshlik and Muruntau open pit mines. As a result, an achievable level of the target productivity of the ECG-20K excavator is estimated for the considered open pit mines.

Ключевые слова: mining excavator; operation; impact factors; ergatic system; ergatic control factor

Для цитирования: Khamidov O.U., Shibanov D.A., Shishkin P.V., Kolpakov V.O. Efficiency of excavators application in open pit mines of Uzbekistan. *Russian Mining Industry*. 2024;(5):135–142. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5-135-142>

Введение

Как известно из многочисленных литературных источников [1–3], на эффективность работы экскаватора оказывают влияние горно-геологические и горнотехнические условия, качество подготовки забоя и горной массы, эргатический фактор управления экскаватором, техническое обслуживание и ремонт (ТОиР), стратегия, уровень и качество проведения ТОиР, организация ведения горных работ, климатические и погодные условия при естественном старении машины.

Наиболее весомыми, оказывающими негативное влияние на эффективность эксплуатации карьерных экскаваторов, являются эргатический фактор управления и качество подготовки горной массы. Их суммарный вес, по оценкам экспертов, составляет порядка 70% [4].

Под термином «эргатический фактор управления» понимается недетерминированный процесс управления экскаватором, оцениваемый изменением потока отказов и средней наработкой между отказами. Эргатический фактор управления функционально отличается опытом (квалификационным разрядом машиниста), что обуславливается уровнем адаптивности к постоянно меняющимся условиям забоя, точностью позиционирования рабочего оборудования в забое и средним значением цикла работы экскаватора, а также добросовестным отношением к выполнению работ в рамках своей профессиональной компетенции.

Методы

Оценка рисков снижения производительности экскаваторов основывается на выявлении наиболее вероятных событий снижения эффективности функционирования экскаватора. Факторы условно разделены на две категории: объективные, не зависящие от человека, и организационные, определенные организацией работ и эксплуатации машины.

К объективным отнесены: горно-геологические и горнотехнические условия эксплуатации, климатические факторы; к организационным – организация ведения горных работ, качество подготовки забоя и горной массы, эргатический фактор управления, проведение технического обслуживания и ремонта. Влияние данных факторов можно контролировать и управлять ими, снижая риски неблагоприятных ситуаций.

Уровень влияния этих факторов (положительное или негативное) оценивается в относительном виде по сравнению с базовыми условиями эксплуатации экскаватора коэффициентом сохранения эффективности $K_{эф_i}$. Критерии базовых условий определены документацией завода изготовителя, едиными нормами выработки и иной нормативной документацией (табл. 1).

Для фактических условий эксплуатации вводится показатель весомости фактора $K_{в_i}$, он эквивалентен вероятности возникновения рассматриваемого риска.

Величина оценки потерь Q_n при весомости фактора определяется по выражению

$$Q_{II} = \sum_{i=1}^n Q K_{эф_i} K_{в_i} \tag{1}$$

Целевая (достижимая) производительность в реальных условиях эксплуатации рассчитывается по следующей формуле:

Таблица 1
Производительность экскаватора ЭКГ-20К в базовых условиях эксплуатации

Table 1
Performance of the EKG-20K excavator in basic operating conditions

№ п/п	Наименование характеристики	ЭКГ-20К
1	Вместимость ковша, м³	20
2	Плотность породы в целике, т/м³	2,6
3	Насыпная плотность породы, т/м³	1,8
4	Коэффициент разрыхления	1,2
5	Коэффициент наполнения ковша	0,97
6	Среднее эксплуатационное время цикла, с	27
7	Коэффициент использования во времени	0,85
8	Теоретическая часовая производительность экскаватора, м³/ч	2667
9	Техническая часовая производительность экскаватора, м³/ч	2156
10	Эксплуатационная часовая производительность экскаватора, м³/ч	1724
11	Эксплуатационная годовая производительность экскаватора, тыс. м³/год	12 416

$$Q_d = Q \left(1 - \sum_{i=1}^n K_{эф_i} K_{в_i} \right) \tag{2}$$

Результаты

1. Климатические факторы

Эксплуатация оборудования несоответствующего климатического исполнения

Для минимизации негативного влияния различных климатических факторов [5] экскаваторы оснащаются агрегатами соответствующего климатического исполнения для эксплуатации в конкретных условиях.

Узбекистан отличается сухим климатом с горячим летом (температура до +45 °С) и относительно холодной зимой (до –10 °С в январе) [6]. Незначительное количество осадков (до 1000 мм в год) и наличие ветров приводят к возникновению большого количества пыли и песка в воздухе [7]. Электрическое оборудование экскаватора оснащено системами охлаждения и пылеподавления, чего нельзя сказать о механических системах, особенно открытых парах трения: зубчатый венец, шарниры рабочего оборудования. Таким образом, $K_{в1.1}$ для данного фактора принят равным 0,10. В случае несоответствия климатического исполнения машины условиям эксплуатации для минимизации негативного влияния различных климатических факторов [5] $K_{эф1.1}$ оценивается на уровне 0,69–0,71.

2. Горно-геологические и горнотехнические условия

Отклонение фактических горно-геологических и горнотехнических условий от базовых

Базовая наработка экскаватора закладывается при экскавации горной массы II-III категории по трудности экскавации: объемный вес горной массы в целике до 2500 кг/м³, удельное сопротивление черпанию до 0,3 МПа. Наихудшим условиям соответствуют породы V категории по трудности экскавации: объемный вес горной

массы в целике до 4300 кг/м^3 , удельное сопротивление черпанию до $0,4 \text{ МПа}$ ¹. $K_{\text{эф}2.1}$ в таких условиях равен $0,65\text{--}0,69$.

На карьерах Кальмакир, Мурунтау, Ёшлик и др. разрабатываются породы IV категории со сплошным рыхлением взрыванием. Объемный вес добываемых руд – 2600 кг/м^3 , скальных пород – 2400 кг/м^3 и песковых пород – 1780 кг/м^3 . Коэффициент разрыхления пород колеблется от $1,4$ до $1,6$, а коэффициент наполнения ковша от $0,75$ до $0,85$ [8]. Рудоуправление в основном не перенаправляет технику с одного вида работ на другой. Таким образом, для данных условий эксплуатации $K_{\text{в}2.1}$ для данного фактора принят равным $0,18$.

3. Организация ведения горных работ

3.1. Планирование, координация и контроль процессов при эксплуатации экскаватора

Процессы планирования, координации и контроля способны оказать существенное негативное влияние на эффективность. Для базовых условий эксплуатации значение коэффициента технического использования принято равным $K_{\text{тн}} = 0,9$. Нерациональная координация между различными структурными подразделениями ГОКа в технологическом процессе приводит к недостижению целевых показателей комбината, смещению производственных графиков (план горных работ, графики ТОиР) [9]. При этом $K_{\text{эф}3.1} = 0,3\text{--}0,34$.

На карьере Узбекистана организована строгая иерархическая структура организации работ, поддерживается высокий уровень коэффициента использования оборудования во времени. По статистическим данным для экскаваторов ЭКГ-20К среднее значение коэффициента использования оборудования во времени с момента поставки до капитального ремонта составило $0,75\text{--}0,8$. Ведутся работы по цифровизации производства. В данных условиях эксплуатации $K_{\text{в}3.1}$ принят равным $0,15$.

3.2. Несоответствие технических характеристик погрузочного и транспортирующего оборудования

Несоответствие технических характеристик приводит к увеличению времени цикла погрузки. Считается наиболее эффективной работа комплекса экскаватор-самосвал при заполнении кузова 3–5 ковшами [10–12]. При несоблюдении данного условия $K_{\text{эф}3.2}$ равен $0,79\text{--}0,81$.

На карьерах Узбекистана экскаваторы ЭКГ-20К осуществляют погрузку самосвалов грузоподъемностью 220 т [8; 13]. Экскаваторы, параметры которых не соответствуют транспортируемому оборудованию, переведены на перегрузку, погрузку в железнодорожные вагоны и на отвалы. Таким образом, $K_{\text{в}3.2}$ для данного фактора принят равным $0,01$.

4. Качество подготовки забоя и горной массы

4.1. Размер куска горной массы

Для экскаваторов российского производства эксплуатационной документацией установлен средний размер куска горной массы не более $0,3 \text{ м}$. [14]. Увеличение среднего размера куска горной массы приводит к увеличению времени цикла, увеличению нагрузки на металлоконструкции рабочего оборудования, привода и на другие агрегаты и, как следствие, к повышению интенсификации расходования ресурса [1; 15; 16]. При наихудших условиях $K_{\text{эф}4.1} = 0,63\text{--}0,65$.

¹ Единые нормы выработки на открытые горные работы для предприятий горнодобывающей промышленности. Экскавация и транспортирование. Часть III. Экскавация и транспортирование горной массы автосамосвалами. М.: Центр бюро нормативов по труду НИИ труда; 1979.

На карьерах Узбекистана еженедельно проводится предварительное сплошное рыхление взрыванием. Средний размер куска не превышает $0,30\text{--}0,35 \text{ мм}$ [17–19]. $K_{\text{в}4.1}$ для данного фактора принят равным $0,12$.

4.2. Работа экскаватора с уклоном рабочей площадки больше допустимого

В эксплуатационной документации установлен допустимый угол наклона экскаватора при работе не более 5° [14]. Превышение ведет к неравномерному распределению нагрузки на ОПУ: неравномерному износу роликов и рельсов [20; 21]. Также работа в таких условиях требует от оператора более высокой квалификации и опыта. $K_{\text{эф}4.2}$ в таких условиях принят равным $0,78\text{--}0,82$.

Планирование рабочих площадок на карьерах Узбекистана ведется ежедневно бульдозерами и осуществляется подсыпка щебнем. $K_{\text{в}4.2}$ для данного фактора принят равным $0,01$.

4.3. Наличие невзорванных участков в забое, в том числе в подошве уступа

Данный риск зависит от качества проведения взрывных работ, наблюдается работа оборудования в стопорных режимах и рост потока отказов [22–24]. Для ликвидации невзорванных участков требуется проведение дополнительных буровзрывных работ (БВР). $K_{\text{эф}4.3}$ для данных условий равен $0,39\text{--}0,41$.

Технология ведения БВР на карьерах Узбекистана обеспечивается сеткой и размером скважин, параметрами перебура и др. [17–19], что существенно снижает вероятность возникновения данного риска. $K_{\text{в}4.3}$ для данного фактора принят равным $0,10$.

4.4. Геометрические размеры и форма забоя

К данному фактору относятся высота забоя, угол откоса, ширина рабочей площадки, объем экскаваторного блока. Несоответствие экскаватора параметрам по технологии ведения горных работ снижает эффективность эксплуатации, осложняет маневрирование экскаватора, увеличивает риск обрушения породы [25]. При малых размерах экскаваторного блока экскаватор отрабатывает его до следующего массового взрыва, что ведет к организационному простоем машины и усложняет маневрирование самосвала под погрузку [26; 27]. При несоответствии этих параметров $K_{\text{эф}4.4} = 0,67\text{--}0,69$.

При существующей технологии горных работ карьера Кальмакир экскаватор обеспечен фронтом работ до следующего массового взрыва, высота уступов 15 м , ширина рабочей площадки 50 м при погрузке на железнодорожный транспорт и 40 м при погрузке в автосамосвалы [9; 28]. Таким образом, в условиях эксплуатации карьера Кальмакир $K_{\text{в}4.4}$ для данного фактора принят равным $0,01$.

5. Эргатический фактор управления

5.1. Квалификация машиниста

На карьерах Узбекистана к управлению экскаватором большой единичной мощности допускаются лица, имеющие средне-специальное профессиональное образование, стаж работы помощником не менее 2 лет или машинистом не менее 1 года. Недостаток квалификации увеличивает вероятность ошибочных действий, что приводит к повышению нагрузки на механические системы экскаватора, ускоряя выработку ресурса оборудования и элементов конструкции [1; 3; 29]. При этом $K_{\text{эф}5.1}$ оценивается в диапазоне $0,18\text{--}0,22$.

$K_{\text{в}5.1}$ с учетом отсутствия достоверных данных контроля навыков управления базовым значениям (обеспечение

равномерной загрузки приводов, рациональной траектории копания и плавности наполнения ковша) принят равным 0,10. Значение $K_{в5.1}$ может быть скорректировано при оценке квалификации на тренажерном комплексе.

5.2. *Нарушение правил безопасности при управлении экскаватором*

Нарушение правил приводит к увеличению вероятности возникновения аварийных ситуаций, что влечёт за собой риск травматизма и повреждения оборудования. Управление машиной с нарушением правил снижает общую эффективность работы, увеличивая время на выполнение задач и повышая вероятность дополнительных эксплуатационных расходов, приводит к несчастным случаям и травматизму. В данных условиях $K_{эф5.2} = 0,18-0,22$.

На карьерах Узбекистана машинисты проходят ежедневный инструктаж по технике безопасности и охране труда. Также каждые три года сотрудники проходят обязательные курсы по охране труда и технике безопасности. Однако учесть индивидуальные особенности каждого машиниста не представляется возможным. Таким образом, для данного фактора $K_{в5.2}$ принят равным 0,05.

5.3. *Эффективность управления экскаватором*

Эффективность управления характеризуется рациональностью выбора режима работы, подбором корректной скорости движения рабочего органа и рациональной траекторией набора горной массы [30–32]. Отклонение данных параметров от базовых значений приводит к снижению эффективности машины. Увеличивается расход энергетических ресурсов, что отражается на эффективности процесса экскавации. $K_{эф5.3}$ в таких условиях равен 0,23–0,25.

На карьерах Узбекистана оценка режимов работы машины в рамках рациональных скоростей и траекторий набора горной массы не ведется, а специальных апробированных методик и рекомендаций в настоящее время не существует. Но с учетом высокой квалификации $K_{в5.3}$ для данного фактора принят равным 0,10.

6. **Техническое обслуживание и ремонт**

6.1. *Отклонение фактического ТОиР от регламента*

Это ведет к росту аварийных отказов, снижению качества выполнения ремонтных работ, нерациональному использованию ресурсов и увеличению затрат на его эксплуатацию [1; 21; 33]. С учетом времени простоя экскаваторов на ТОиР $K_{эф6.1} = 0,54-0,57$.

На карьерах Узбекистана ТОиР карьерных экскаваторов проводится по регламенту завода-изготовителя. Управление специализированных ремонтных работ планирует ТОиР с учетом индивидуальных особенностей эксплуатации оборудования. Избыточный парк экскаваторов позволяет останавливать машины для проведения ТОиР без ущерба выполнения плана горных работ. Машинисты экскаваторов участвуют в проведении ТОиР. Таким образом, $K_{в6.1}$ для данного фактора принят равным 0,01.

6.2. *Недостаточная квалификация ремонтного персонала*

Отсутствие должной квалификации оказывает прямое влияние на качество выполнения ТОиР экскаватора. Несвоевременное обнаружение дефектов и неправильная интерпретация диагностических параметров приводят к увеличению риска возникновения повторных отказов особенно в критические моменты работы при необходимости выполнения производственного плана. Снижение качества ТОиР ухудшает эксплуатационные характеристики

экскаватора, приводит к более частым обслуживанием и ремонтам. $K_{эф6.2} = 0,21-0,23$.

Ремонтный персонал карьеров Узбекистана имеет высокую квалификацию и большой опыт работы. Количество ремонтного персонала избыточно, также к проведению ТОиР привлекается технологический персонал. Таким образом, $K_{в6.2}$ для данного фактора принят равным 0,01.

6.3. *Низкое качество используемых запасных частей*

Этот фактор оказывает прямое влияние на межремонтные интервалы, наработку до отказа и ресурс отдельных узлов и деталей [20; 34], что влечет за собой увеличение времени простоя, необходимости частой замены деталей, а также при большой нагрузке ремонтной службы к нехватке трудовых ресурсов и технических средств для выполнения требуемого объема ТОиР. Кроме того, использование некачественных запасных частей приводит к снижению безопасности работы, увеличивая риск возникновения аварийных ситуаций. $K_{эф6.3} = 0,34-0,38$.

На карьерах Узбекистана производство быстроизнашиваемых и наиболее часто заменяемых деталей локализовано [35], ответственные узлы и несущие металлоконструкции заказываются у завода-изготовителя. $K_{в6.3}$ для данного фактора принят равным 0,05.

6.4. *Длительные сроки проведения ТОиР*

Нерегулярность проведения обслуживания и ремонта приводит к увеличению времени простоя экскаватора, снижая его общую эксплуатационную эффективность. Основной причиной длительных сроков проведения ТОиР является ожидание поставок запасных частей. $K_{эф6.4} = 0,43-0,47$.

На карьерах Узбекистана при аварийных отказах ответственных узлов, заказываемых у завода-изготовителя, ожидание поставок занимает достаточно большой интервал времени. Для минимизации риска отсутствия запасных частей на карьере Кальмакир создан большой оборотный фонд запасных частей. Таким образом, $K_{в6.4}$ для данного фактора принят равным 0,07. Подтверждается это динамикой коэффициента технической готовности на карьерах Узбекистана. За время с ввода в эксплуатацию до капитального ремонта он не снижался ниже уровня 0,87. В течение пяти лет после ввода в эксплуатацию экскаватора ЭКГ-20К средняя производительность составила 5,0–5,5 млн м³.

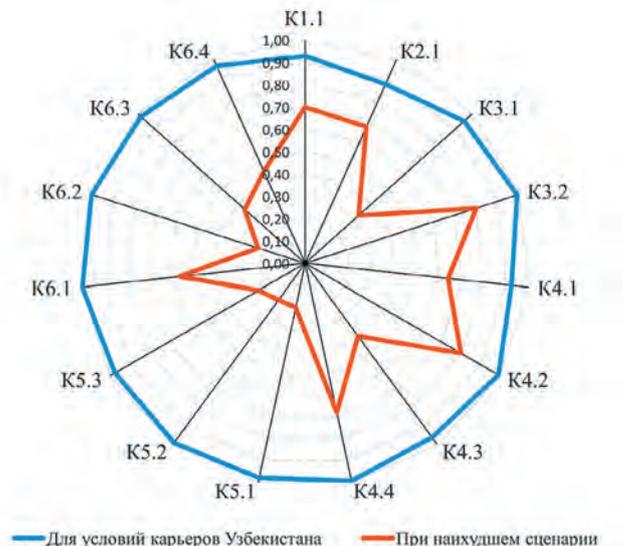


Рис. 1 Коэффициент сохранения эффективности

Fig 1 Efficiency preservation ratio

Таким образом, для условий Республики Узбекистан без изменения текущей технологии ведения горных работ, стратегии ТОиР, регламентов обучения и оценки квалификации персонала целевая производительность составит $Q_d = 6340$ тыс. м³/год.

Выводы

Проведенный анализ эффективности применения экскаваторов на карьерах Узбекистана показал, что наибольшее влияние на производительность оказывают группы рисков – эргатический фактор управления и ТОиР, среднее значение коэффициента сохранения эффективности для этих факторов составляет 0,21 и 0,4 соответственно. Данные факторы могут значительно снизить производительность оборудования. Для минимизации их влияния требуется контроль условий эксплуатации и при их отклонении от заданных параметров проведение корректирующих и организационных мероприятий.

Вклад авторов

О.У. Хамидов – подготовка данных; систематизация материала; анализ результатов исследования; написание текста статьи.

Д.А. Шибанов – генерация идеи; постановка задачи исследования; написание текста статьи.

П.В. Шишкин – сбор данных для анализа; систематизация материала.

В.О. Колпаков – подготовка и обработка данных; анализ результатов.

На примере экскаватора ЭКГ-20К, как широко используемого на карьерах Узбекистана, было показано, как изменяется целевая производительность в зависимости от фактических условий эксплуатации. Введение коэффициента весомости влияющих факторов позволило более точно оценить их воздействие на потери целевой производительности. Методика может быть использована для более эффективного планирования и управления работой парка карьерного оборудования, позволяет адаптировать эксплуатационные процессы не только на карьерах Узбекистана, но и на других горнодобывающих предприятиях.

Мониторинг и сбор данных эксплуатации карьерных экскаваторов продолжается по настоящее время, данные используются для уточнения моделей оценки эффективности экскаваторных парков России и ближнего зарубежья.

Author's Contribution

O.U. Khamidov – preparation of data; systematization of materials; analysis of research results; writing the text of the article.

D.A. Shibanov – idea generation; setting the research problem; writing the text of the article.

P.V. Shishkin – collection of data for analysis; systematization of materials.

V.O. Kolpakov – preparation and processing of data; analysis of the results.

Список литературы / References

1. Иванов С.Л., Иванова П.В., Кувшинкин С.Ю. Оценка наработки карьерных экскаваторов перспективного модельного ряда в реальных условиях эксплуатации. *Записки Горного института*. 2020;242:228–233. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.228>
Ivanov S.L., Ivanova P.V., Kuvshinkin S.Y. Promising model range career excavators operating time assessment in real operating conditions. *Journal of Mining Institute*. 2020;242:228–233. (In Russ.) <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.2.228>
2. Корогодин А.С., Иванов С.Л. Техническое обслуживание и ремонт цапф барабанной мельницы плавучего комплекса горного оборудования. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2023;15(2):760–770. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-760-770>
Korogodin A.S., Ivanov S.L. Maintenance and repair of drum mill trunnions of a floating mining equipment complex. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2023;15(2):760–770. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-3-760-770>
3. Теплякова А.В., Азимов А.М., Алиева Л., Жуков И.А. Обзор и анализ технических решений для повышения долговечности и улучшения технологичности элементов ударных узлов бурильных машин. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022;(9):120–132. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_120
Teplyakova A.V., Azimov A.M., Alieva L., Zhukov I.A. Improvement of manufacturability and endurance of percussion drill assemblies: review and analysis of engineering solutions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2022;(9):120–132. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_9_0_120
4. Иванова П.В., Асонов С.А., Иванов С.Л., Кувшинкин С.Ю. Анализ структуры и надежности современного парка карьерных экскаваторов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(7):51–57. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2017/7/51_57_7_2017.pdf (дата обращения: 13.05.2024).
Ivanova P.V., Asonov S.A., Ivanov S.L., Kuvshinkin S.Yu. Analysis of structure and reliability of modern fleet of mine shovels. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(7):51–57. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2017/7/51_57_7_2017.pdf (accessed: 13.05.2024).

5. Бобобеков О.К. Факторы, влияющие на производительность дорожно-строительных и коммунальных машин. *Вестник гражданских инженеров*. 2015;(6):180–184.
Bobobekov O.K. Factors affecting the performance of the road building and communal machines. *Bulletin of Civil Engineers*. 2015;(6):180–184. (In Russ.)
6. Ахмадов А., Мельникова Т.Е., Тоштемиров У.Т. Анализ микроклиматических условий карьера Кальмакыр. *Евразийский журнал академических исследований*. 2022;(2):1207–1216. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7393333>
Akhmadov A., Melnikova T.E., Toshtemirov U.T. Analysis of microclimatic conditions of the Kalmakyr open pit mine. *Eurasian Journal of Academic Research*. 2022;(2):1207–1216. (In Russ.) <https://doi.org/10.5281/zenodo.7393333>
7. Агагена А., Михайлов А.В. Влияние железорудной пыли на изнашивание поверхности штоков гидроцилиндров карьерного экскаватора. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(11-1):5–23. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_5
Agaguena A., Mikhailov A.V. Iron ore dust influence on the wear surface of quarry excavator hydraulic cylinder rods. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(11-1):5–23. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_111_0_5
8. Петросов Ю.Э., Петросова Л.И. *Разработка глубоких горизонтов рудных карьеров высокими уступами*. LAP Lambert Academic Publishing; 2018. 73 с.
9. Erwanda R., Ridwan A.Y., Muttaqin P.S. Optimization of heavy equipment costs in coal mining overburden production using match factor and linear programming. In: *Proceedings of the Conference on Broad Exposure to Science and Technology 2021 (BEST 2021)*. Atlantis Press; 2022, pp. 323–331. <https://doi.org/10.2991/aer.k.220131.049>
10. Кириллов А.О., Кузьмина Л.М., Терехин Е.П. Новый ковш экскаватора ЭКГ-15 для работы на перегрузочных пунктах глубоких карьеров. В кн.: Иванцова Е.Н., Уваров В.М. (ред.) *Молодежь и научно-технический прогресс: сб. докл. 26-й междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. г. Губкин, 6 апр. 2023 г.* Губкин; Старый Оскол: Ассистент плюс; 2023. Т. 1. С. 55–60.
11. Бирюков А.Н., Таутиев И.М. Оптимизация процесса взаимодействия средств механизации при проведении демонтажных работ. В кн.: Карпухина О.И. (ред.) *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году: сб. науч. тр. РААСН*. М.: Издательство АСВ; 2022. Т. 2. С. 49–57.
12. Кумыкова Т.М., Кумыков В.Х. Методика формирования погрузочно-транспортного комплекса глубоких карьеров полиметаллических руд. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017;(4):105–116.
Kumukova T.M., Kumukov V.Kh. Method of shaping loading-and-transportation system in deep open pit complex ore mines. *Fiziko-Tekhnicheskiye Problemy Razrabotki Poleznykh Iskopaemykh*. 2017;(4):105–116. (In Russ.)
13. Мирсаидов Г.М., Салямов Р.Д., Вдовин А.А. Организация работы транспорта на руднике «Кальмакыр». *Горный журнал*. 2009;(S1):36–37.
Mirsaidov G.M., Salyamov R.D., Vdovin A.A. Organization of transport operation at the Kalmakyr mine. *Gornyi Zhurnal*. 2009;(S1):36–37. (In Russ.)
14. Донской В.М., Шипилин В.А., Шибанов Д.А., Мельников Д.А. *Экскаватор карьерный гусеничный ЭКГ-20К. Руководство по эксплуатации*. Колпино: ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова», 2013. Т. 1. 113 с.
15. Саадун А., Фредж М., Букарм Р., Хаджи Р. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование. *Записки Горного института*. 2022;257:822–832. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.84>
Saadoun A., Fredj M., Boukarm R., Hadji R. Fragmentation analysis using digital image processing and empirical model (KuzRam): a comparative study. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:822–832. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.84>
16. Маринин М.А., Рахманов Р.А., Аленичев И.А., Афанасьев П.И., Сушкова В.И. Изучение влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на производительность экскаватора WK-35. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(6):111–125. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_111
Marinin M.A., Rakhmanov R.A., Alenichev I.A., Afanasyev P.I., Sushkova V.I. Effect of grain size distribution of blasted rock on WK-35 shovel performance. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(6):111–125. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_6_0_111
17. Носиров У.Ф., Усмонова Х.С.К. Научное обоснование буровзрывных работ на больших высотах в условиях Кальмакыр кони. *Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*. 2021;1(4):364–368.
Nosirov U.F., Usmonova Kh.S.K. Scientific justification of drilling and blasting operations at high altitudes in conditions of the Kalmakyr mine. *Oriental renaissance: Innovative, educational, natural and social sciences*. 2021;1(4):364–368. (In Russ.)

18. Махмудов Д.Р., Петросов Ю.Э. Технология производства буровзрывных работ на глубоких карьерах Узбекистана. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017;(5):331–336. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2017/5/331_336_5_2017.pdf (accessed: 13.05.2024).
Makhmudov D.R., Petrosov Yu.E. Drilling-and-blasting technology in open pit mines in Uzbekistan. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2017;(5):331–336. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2017/5/331_336_5_2017.pdf (дата обращения: 13.05.2024).
19. Петросова Л.И. Повышение эффективности и безопасности управления карьерным рудопотоком с использованием спутниковых навигационных систем GPS. В кн.: *Дальневосточная весна – 2018: материалы 16-й Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности, г. Комсомольск-на-Амуре, 27 апр. 2018 г.* Комсомольск-на-Амуре: КНАГУ; 2018. С. 186–187.
20. Ivanov S., Knyazkina V., Myakotnykh A. Recording gear-type pump acoustic signals for assessing the hydraulic oil impurity level in a hydraulic excavator transmission. *E3S Web of Conferences*. 2021;326:00014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132600014>
21. Tubis A., Werbińska-Wojciechowska S., Sliwinski P., Zimroz R. Fuzzy risk-based maintenance strategy with safety considerations for the mining industry. *Sensors*. 2022;22(2):441. <https://doi.org/10.3390/s22020441>
22. Аленичев И.А., Рахманов Р.А. Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера. *Записки Горного института*. 2021;249:334–341. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.2>
Alenichev I.A., Rakhmanov R.A. Empirical regularities investigation of rock mass discharge by explosion on the free surface of a pit bench. *Journal of Mining Institute*. 2021;249:334–341. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.3.2>
23. Шишков Р.И., Федорин В.А. Обоснование вскрытия и подготовки модульного шахтоучастка при комбинированном способе добычи угля в Кузбассе на примере ШУ «Байкаимская». *Записки Горного института*. 2020;243:293–298. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.293>
Shishkov R.I., Fedorin V.A. Justification of stripping and development of a modular mine site for a combined coal mining method in Kuzbass on the example Baikaimskaya mine site. *Journal of Mining Institute*. 2020;243:293–298. <https://doi.org/10.31897/PMI.2020.3.293>
24. Семькина, И.Ю., Кипервассер М.В., Герасимук А.В. Исследование токов привода подъема мостовых кранов металлургических предприятий для раннего диагностирования превышения массы груза. *Записки Горного института*. 2021;247:122–131. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.13>
Semykina I.Y., Kipervasser M.V., Gerasimuk A.V. Study of drive currents for lifting bridge cranes of metallurgical enterprises for early diagnosis of load excess weight. *Journal of Mining Institute*. 2021;247:122–131. <https://doi.org/10.31897/PMI.2021.1.13>
25. Иванов С.Л. Изменение наработки современных отечественных экскаваторов ЭКГ от условий их функционирования. *Записки Горного института*. 2016;221:692–700. <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.5.692>
Ivanov S.L. Changes in operating time of modern domestic EKG excavators in dependence of their functioning conditions. *Journal of Mining Institute*. 2016;221:692–700. <https://doi.org/10.18454/PMI.2016.5.692>
26. Москвичев В.В., Ковалев М.А. Оценка показателей эксплуатационной надежности карьерных канатных экскаваторов. *Транспортные системы и технологии*. 2020;6(4):25–44. <https://doi.org/10.17816/transsyst20206425-44>
Moskvichev V.V., Kovalev M.A. Assessment of operational reliability indicators of pit rope-operated excavators. *Transportation Systems and Technology*. 2020;6(4):25–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/transsyst20206425-44>
27. Дубинкин Д.М., Садовец В.Ю., Котиев Г.О., Карташов А.Б. Исследование процесса транспортирования вскрышных пород и угля на разрезах. *Техника и технология горного дела*. 2019;(4):50–66. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2019-4-50-66>
Dubinkin D.M., Sadovets V.Yu., Kotiev G.O., Kartashov A.V. Overburden and coal transportation research at open pit mines. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2019;(4):50–66. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2019-4-50-66>
28. Annakulov T., Gaibnazarov S., Askarov A., Mamadiyeva L. Prospects for the use of cyclic-flow technology for the transportation of rocks at the Yoshlik-1 quarry of JSC Almalyk mining and metallurgical combine. *E3S Web of Conferences*. 2023;414:06007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341406007>
29. Пумпур Е.В., Князькина В.И., Сафрончук К.А., Иванов С.Л. Оценка факторов влияния на выбор стратегии технического обслуживания экскаваторов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(S41):3–19. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-41-3-19>
Pumpur E.V., Knyazkina V.I., Safronchuk K.A., Ivanov S.L. Assessment of the influence factors on the choice of the maintenance strategy for excavators. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(S41):3–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-12-41-3-19>

30. Лукашук О.А., Летнев К.Ю., Комиссаров А.П. Определение режимов работы двигателей главных механизмов одноковшового экскаватора. Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2017;(5):52–58.
Lukashuk O.A., Letnev K.Yu., Komissarov A.P. The modes of operation determination of the main mechanisms engines of a power shovel. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi Zhurnal. 2017;(5):52–58.
31. Комиссаров А.П., Лагунова Ю.А., Набиуллин Р.Ш., Хорошавин С.А. Цифровая модель процесса экскавации горных пород рабочим оборудованием карьерного экскаватора. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022;(4):156–168. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_4_0_156
Komissarov A.P., Lagunova Yu.A., Nabiullin R.Sh., Khoroshavin S.A. Digital model of shovel work process. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2022;(4):156–168. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_4_0_156
32. Yu X., Pang X., Zou Z., Zhang G., Hu Y., Dong J., Song H. Lightweight and high-strength design of an excavator bucket under uncertain loading. Mathematical Problems in Engineering. 2019;2019:190819. <https://doi.org/10.1155/2019/3190819>
33. Салимов А.Э., Шибанов Д.А., Иванов С.Л. Риски отказов карьерного экскаватора, связанные с его техническим обслуживанием и ремонтом. Горная промышленность. 2024;(2):97–102. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-97-102>
Salimov A.E., Shibanov D.A., Ivanov S.L. Failure risks of mine excavator associated with its maintenance and repair. Russian Mining Industry. 2024;(2):97–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-2-97-102>
34. Габов В.В., Задков Д.А., Нгуен В.С., Хамитов М.С., Молчанов В.В. К проблеме совершенствования рабочего инструмента горных выемочных машин. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022;(6-2):205–222. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_205
Gabov V.V., Zadkov D.A., Nguyen V.X., Hamitov M.S., Molchanov V.V. To the problem of improvement the working tools of mining excavation machines. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2022;(6-2):205–222. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2022_62_0_205
35. Демина Г.А. Горная техника Группы Газпромбанка: Уралмашзавода и ИЗ КАРТЭКС – на горнодобывающих предприятиях Узбекистана. Горная промышленность. 2017;(4):40–42.
Demina G.A. Mining equipment of the Gazprombank Group: Uralmashzavod and IZ KARTEX, at mining operations in Uzbekistan. Russian Mining Industry. 2017;(4):40–42. (In Russ.)

Информация об авторах

Хамидов Ойбек Улугбек угли – аспирант кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Шибанов Даниил Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; e-mail: shibanov_da@pers.spmi.ru

Шишкин Павел Витальевич – кандидат технических наук, заместитель декана механико-машиностроительного факультета, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-6215-158X>

Колпаков Владимир Олегович – студент кафедры машиностроения, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Information about the authors

Oybek U. Khamidov – Postgraduate Student, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

Daniil A. Shibanov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; e-mail: shibanov_da@pers.spmi.ru

Pavel V. Shishkin – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Dean, Faculty of Mechanics and Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-6215-158X>

Vladimir O. Kolpakov – Student, Department of Mechanical Engineering, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation

Article info

Received: 02.08.2024

Revised: 27.08.2024

Accepted: 19.09.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.08.2024

Поступила после рецензирования: 27.08.2024

Принята к публикации: 19.09.2024