

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.232.8

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-3-54-63



МЕТОДОЛОГИЯ ОБОСНОВАНИЯ ГОРНОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РУДНЫХ КАРЬЕРОВ

Кузнецов Д.В., Косолапов А.И.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Анализ открытых горных работ в современных условиях показывает непривычное совершенствование карьерного оборудования. При этом технологические особенности разработки месторождений почти не ограничивают его мощность и энерговооруженность. Вместе с тем такое развитие связано с усложнением условий разработки, ростом глубины карьеров, сокращением площади рабочего пространства, перемещением вектора производства в районы с неблагоприятными климатическими факторами. С учетом этого определение оптимальной модели оборудования достаточно затруднено. **Используемые методы.** Применены аналитический обзор, численные расчеты, сопоставительная оценка. **Новизна.** Представлены результаты исследований по обоснованию подхода и критерии для выбора структуры технологического комплекса карьерного оборудования, включающего буровой станок, гидравлический или электрический экскаватор по типу «механическая лопата», автосамосвалы и прочее вспомогательное оборудование. **Результат.** Установлено, что основой для выбора оптимальных условий их эксплуатации является оценка динамики производительности экскаваторов и автосамосвалов в зависимости от периода года и срока эксплуатации, прочностных характеристик пород, типоразмеров, количества ковшей, загружаемых экскаватором в автосамосвал, расстояния перевозок, организационных простоев во времени цикла работы с учетом влияния климата. Показаны экономические критерии для выбора оптимального сочетания экскаватора и автосамосвала в комплексе. Доказано, что удельные накопленные затраты на приобретение и эксплуатацию оборудования комплекса за срок эксплуатации экскаватора экономически характеризуют обстоятельства перехода денежных средств в состояние горной массы, экскавируемой из массива и перемещаемой на определенное расстояние. **Практическая значимость.** На примере некоторых моделей гидравлических и электрических экскаваторов, имеющих различный нормативный период эксплуатации и технические характеристики, выполнена сравнительная оценка в сопоставимых условиях. При этом определены оптимальные условия их эксплуатации в сочетании с автосамосвалами.

Ключевые слова: комплексы горнотранспортного оборудования, электрический экскаватор по типу «механическая лопата», гидравлический экскаватор, автосамосвал, срок службы карьерной техники, карьер, добыча руды

© Кузнецов Д.В., Косолапов А.И., 2022

Для цитирования

Кузнецов Д.В., Косолапов А.И. Методология обоснования горнотранспортного оборудования для рудных карьеров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №3. С. 54-63. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-54-63>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

METHODOLOGY FOR JUSTIFYING THE SELECTION OF MINING AND CONVEYOR EQUIPMENT FOR ORE QUARRIES

Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The analysis of open-cast mining in modern conditions shows continuous improvement of quarry equipment. Thus, technological features of development of deposits impose almost no limitations on its capacity and power-weight ratio. At the same time, such development is connected with more complicated conditions of mining, deeper quarries, less area of working space, and moving of mining to areas with unfavorable climatic factors. In view of this, it is quite difficult to determine an optimal model of equipment. **Methods Applied.** An analytical review, numerical calculations, comparative evaluation. **Originality.** The paper presents the research results providing a rationale for the approach and criteria for choosing a structure of the pit equipment technological complex, including a drilling rig, a hydraulic or electric excavator, a power shovel, dump trucks, and other auxiliary equipment. **Result.** It is stated that the basis of choosing optimal conditions of equipment operation is the assessment of production performance of excavators and dump trucks depending on the period of the year and a period of operation, rock strength characteristics, types and sizes, number of buckets loaded by excavators into dump trucks, transportation distance, administrative downtime during the operation cycle, taking into account climatic effect. The paper contains the economic criteria for choosing an optimal combination of an excavator and a dump truck. It is proved that specific accumulated costs of purchasing and operating the complex equipment during the life time of the excavator economically characterize the circumstances of transition of monetary funds into the rock mass, which is excavated from the massif and transported at a certain distance. **Practical Relevance.** Some models of hydraulic and electric excavators, having various specified operation periods and technical characteristics, are used as an example for a comparative evaluation in comparable conditions with determined optimal conditions of their operation combined with dump trucks.

Keywords: mining and conveyor equipment complexes, electric excavator (power shovel), hydraulic excavator, dump truck, mining equipment life span, open pit, ore mining

For citation

Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Methodology for Justifying the Selection of Mining and Conveyor Equipment for Ore Quarries. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 3, pp. 54-63. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-3-54-63>

Введение

В современной практике открытой разработки рудных месторождений Севера карьерами основными выемочно-погрузочными машинами являются экскаваторы. Они системно образуют целые комплексы оборудования, в которых выступают ведущим звеном. Причем при сочетании как минимум со вторым звеном – транспортным или автосамосвалами [1, 2].

При этом модели сопряженных машин в комплексе можно различить по значению каких-либо параметров, например, по вместимости ковша экскаватора или грузоподъемности автосамосвалов.

Поэтому известно, что когда стоит задача о выборе оптимального варианта экскаватора для рудного карьера как наилучшего среди допустимых, в первую очередь она предполагает обоснование его определенного типоразмера во взаимосвязи с типоразмером колесного автосамо-

свала. Причем на современном этапе развития горного дела с учетом возможного применения гидравлических экскаваторов, обладающих возможностью оснащения рабочего оборудования типа «прямая лопата» и «обратная лопата» [3].

К основным горнотехническим и технологическим достоинствам гидравлических экскаваторов в сопоставимых условиях можно отнести: продолжительность рабочего цикла, возможность эксплуатации на рабочих площадках меньших размеров, лучшую адаптацию к свойствам и характеристикам экскавируемого горного массива, наполняемость ковша при черпании, условия для селективной выемки полезного ископаемого, более безопасные условия для экскавации твердых включений и негабаритных кусков в забое, возможность эффективного применения на вспомогательных работах в карьере и др.

Однако известно, что с учетом траектории движения ковша высота уступа, экскавируемого гидравлическим экскаватором, примерно на 70%

меньше, чем паспортная высота черпания. В условиях рудных карьеров Севера гидравлические экскаваторы имеют срок службы в 1,5-2 раза меньше, а эксплуатационные расходы почти в 2 раза выше, чем у электрических, что, главным образом, связано со стоимостью дизельного топлива [1].

Поэтому каждый выбор оптимального варианта экскаватора требует учета множества факторов применительно к условиям месторождений с обоснованием критерии оценки [4-6].

В настоящей статье, исходя из ранее выполненной классификации условий открытой разработки рудных месторождений [7, 8], авторами обобщены результаты подобных исследований. Предложен подход и критерии для выбора оптимального варианта структуры комплекса оборудования, включающего экскаватор, автосамосвалы, буровые станки и прочее вспомогательное оборудование.

Все численные расчеты справедливы для многообразия экскаваторов и автосамосвалов, представленных на рынке России для условий разработки рудных карьеров с суровым климатом при возможном колебании температуры воздуха, осадков и прочих неблагоприятных природных факторах [1, 9].

Комплексы карьерного оборудования

С учетом отмеченного рассмотрим общеизвестные определения комплекса карьерного оборудования, экскаваторно-автомобильного комплекса и горнотранспортного комплекса.

Комплекс карьерного оборудования – цепь взаимосвязанных машин и механизмов, обеспечивающих надежную и эффективную разработку и перемещение пород [10, 11].

Экскаваторно-автомобильный комплекс – совокупность машин, состоящая из погрузочного и транспортного средств (экскаваторов и автосамосвалов), связанных технологически и организационно между собой единым грузопотоком [12].

Горнотранспортный комплекс – комплекс горных и транспортных машин, обеспечивающих максимальную производительность основной (головной) машины (добычной или вскрышной) и осуществляющих производственный процесс, в котором выполняются все операции – от выемки (экскавации) до погрузки или отвалообразования [13].

С учетом этого основной машиной такого комплекса является экскаватор.

С позиций системного анализа его эксплуа-

тация зависит от характеристик экскавируемой и в дальнейшем транспортируемой горной массы, состояния забоя с его параметрами, высотных отметок, протяженности и состояния автодорог, влияния климата и прочих факторов.

Причем, объединяя работу экскаваторов и автосамосвалов, на карьере формируют технологические грузопотоки, которые могут быть вскрышные и добычные. Технологические потоки делят карьер на участки, где независимо работают горнотранспортные и экскаваторно-автомобильные комплексы.

Каждый грузопоток имеет свое направление и мощность, а его функционирование можно оценить формируемыми затратами на экскавацию и транспортирование горной массы [11].

Скорость подвигания забоев экскаватора

Характерными показателями для выбора экскаваторов в технологических грузопотоках являются их производительность и скорость подвигания забоев.

При соответствующей ширине заходки и суточной производительности экскаваторов скорость подвигания торцовых забоев V , м/сут, предложено определять по формуле

$$V = Q_{\text{з.сут}} / A / h, \quad (1)$$

где $Q_{\text{з.сут}}$ – суточная производительность экскаваторных комплексов оборудования, $\text{м}^3/\text{сут}$; A – ширина заходки, м; h – высота уступа, м.

Время разработки блока панели t , сут, составляет

$$t = \frac{l}{V}, \quad (2)$$

где l – длина блока панели, м.

Так, по результатам численных исследований [8] установлено, что скорость подвигания забоев электрических и гидравлических экскаваторов мелкоплат, рассчитанная по формуле (1), изменяется в широких пределах.

Для гидравлических экскаваторов при высоте уступа 5 м и вместимости ковша 5-10 м^3 она в среднем составляет 18,0-43,3 м/сут, при высоте уступа 10 м и вместимости ковша 10-25 м^3 около 16,4-52,3 м/сут, при высоте уступа 15 м и вместимости ковша 25-50 м^3 около 19,8-47,5 м/сут. Скорость подвигания забоев электрических экскаваторов при высоте уступа 10 м и вместимости

ковша 5-12 м³ в среднем равна 9,2-28 м/сут, при высоте уступа 15 м и вместимости ковша 25-50 м равна 27,7-47,5 м/сут.

Отсюда можно заключить, что для конкретных параметров карьера и оборудования можно определить параметры экскаваторных забоев и с учетом производительности экскаваторов по технологическим грузопотокам рассчитать скорость их подвигания, обеспечивающую наибольшую эффективность разработки месторождения.

Производительность экскаватора

Вместе с тем в дополнение были выполнены исследования по оценке влияния основных факторов на динамику средней производительности экскаваторов.

При этом для определения среднесуточного значения эксплуатационной производительности экскаватора $Q_{\text{с.суг.}}$, м³/сут, предложили использовать формулу

$$Q_{\text{с.суг.}} = 3600 \cdot E \cdot T \cdot n / t_{\text{п}} \cdot K_{\text{н}} / K_{\text{р}} \cdot K_{\text{и.э.}}, \quad (3)$$

где E – вместимость ковша, м³; T – продолжительность смены, ч; n – количество рабочих смен в сутки, смен; $t_{\text{п}}$ – паспортная продолжительность цикла экскавации, с; $K_{\text{н}}$ – коэффициент наполнения ковша, д.ед; $K_{\text{р}}$ – коэффициент разрыхления горных пород в ковше, д.ед; $K_{\text{и.э.}}$ – коэффициент использования экскаватора во времени на чистой работе.

В свою очередь, продолжительность цикла экскавации $t_{\text{п.з.}}$, с, необходимо определять с учетом последовательных операций – от наполнения ковша в забое до его разгрузки в автосамосвал:

$$t_{\text{п.з.}} = t_{\text{ч}} + t_{\text{п}} + t_{\text{р}} + t_{\text{в}}, \quad (4)$$

где $t_{\text{ч}}$ – время черпания, с; $t_{\text{п}}$ – время поворота к месту разгрузки, с; $t_{\text{р}}$ – время разгрузки ковша, с; $t_{\text{в}}$ – время возвращения ковша в забой, с.

Коэффициенты наполнения ковша и разрыхления пород в ковше предопределены характеристиками пород и для крепких пород качеством их подготовки к выемке взрыванием. В соответствии с нормативными данными [1, 11] для экскаваторов типа «механическая лопата» коэффициент наполнения ковша варьирует от 0,75 до 1,5, а коэффициент разрыхления пород в ковше – от 1,08 до 1,5.

Коэффициент $K_{\text{и.э.}}$ учитывает использование экскаватора в течение суток на чистой работе. По рекомендациям [1, 11] при использовании автомобильного транспорта его значение следует принимать в интервале 0,75-0,85.

Для определения среднегодовой и среднемесячной эксплуатационной производительности экскаватора полученное по формуле (3) значение следует увеличивать на количество рабочих дней соответственно в году и месяце.

С учетом этого для любого оцениваемого периода времени эксплуатационную производительность экскаватора $Q_{\text{з}}$, м³, авторами предложено определять по формуле

$$Q_{\text{з}} = Q_{\text{з max}} \cdot \left(\frac{1 - Y_{\text{з1}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{\text{з2}}}{100} \right) \times \left(\frac{1 - Y_{\text{з3}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{\text{з4}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{\text{з5}}}{100} \right) \times \left(\frac{1 - Y_{\text{з6}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{\text{з7}}}{100} \right), \quad (5)$$

где $Q_{\text{з max}}$ – максимальная теоретическая производительность экскаватора, м³; $Y_{\text{з1}}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от технической надежности в течение срока эксплуатации, %; $Y_{\text{з2}}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от вместимости ковша и количества экскаваторных циклов (ковшей загружаемых в автосамосвал), %; $Y_{\text{з3}}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от прочностных характеристик пород, %; $Y_{\text{з4}}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от времени экскаваторного цикла, %; $Y_{\text{з5}}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от времени обмена автосамосвалов в забое, %; $Y_{\text{з6}}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от длины экскаваторного блока панели, %; $Y_{\text{з7}}$ – уровень снижения производительности экскаватора в зависимости от влияния сурового северного климата, %.

Полученные результаты исследований (табл. 1, 2) обобщены с учетом классификации месторождений [7, 8].

При этом максимальная теоретическая производительность экскаватора соответствует следующим условиям выемки и погрузки: первому году эксплуатации ($T_{\text{з}} = 1$ год); наименее прочным породам (с объемным весом $\gamma \leq 1,8 \text{ т/м}^3$); минимальному количеству ковшей, загружаемых в кузов автосамосвала ($k = 3$ ковша); наименьшему времени экскаваторного цикла ($t_{\text{п.з.}} = 20$ с); минимальной продолжительности обмена автосамосвалов в забое в схемах с двухсторонней погрузкой ($t_{\text{o}} = 0$ мин); максимальной заданной длине экскаваторного блока панели ($L_{\text{з}} = 700$ м); наиболее благоприятному климатическому периоду (месяцу $M_{\text{з}}$).

Таблица 1. Динамика уровня снижения производительности гидравлического экскаватора межлопаты в зависимости от различных показателей условий разработки, %

Table 1. Trend in the reduction in productivity of the hydraulic excavator (power shovel) depending on various indicators of mining conditions, %

Показатели	Значения					
T_3 , лет	1-3	3-5	5-8	8-10	—	—
Y_{31} , %	0-10	10-15	15-31	31-40	—	—
k , ковшей	3-4	4-5	5-6	6-7	—	—
Y_{32} , %	0-12	12-22	22-32	32-39	—	—
γ , т/м ³	1,8-2,4	2,4-2,9	2,9-3,3	3,3-3,5	—	—
Y_{33} , %	0-7	7-11	11-14	14-15	—	—
t , с	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
Y_{34} , %	0-10	10-19	19-26	26-32	32-37	37-41
t_0 , мин	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3
Y_{35} , %	0-18	18-30	30-39	39-46	46-51	51-55
L , м	700-600	600-500	500-400	400-300	—	—
Y_{36} , %	0-7	7-15	15-27	27-45	—	—
M_3	апрель-октябрь	март, ноябрь	декабрь-февраль	—	—	—
Y_{37} , %	0-20	20-30	30-40	—	—	—

Таблица 2. Динамика уровня снижения производительности электрического экскаватора межлопаты в зависимости от различных показателей условий разработки, %

Table 2. Trend in the reduction in productivity of the electric excavator (power shovel) depending on various indicators of mining conditions, %

Показатели	Значения						
T_3 , лет	1-3	3-5	5-8	8-10	10-16	16-20	20-24
Y_{31} , %	0-5	5-7	7-17	17-21	21-38	38-50	50-58
k , ковшей	3-4	4-5	5-6	6-7	—	—	—
Y_{32} , %	0-16	16-26	26-34	34-43	—	—	—
γ , т/м ³	1,8-2,4	2,4-2,9	2,9-3,3	3,3-3,5	—	—	—
Y_{33} , %	0-7	7-11	11-14	14-15	—	—	—
t , с	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	—
Y_{34} , %	0-10	10-19	19-26	26-32	32-37	37-41	—
t_0 , мин	0-0,5	0,5-1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3	—
Y_{35} , %	0-18	18-30	30-39	39-46	46-51	51-55	—
L_3 , м	700-600	600-500	500-400	400-300	—	—	—
Y_{36} , %	0-7	7-15	15-27	27-45	—	—	—
M_3	апрель-октябрь	март, ноябрь	декабрь-февраль	—	—	—	—
Y_{37} , %	0-10	10-15	15-20	—	—	—	—

Уровень снижения эксплуатационной производительности экскаватора представляет отношение его фактической производительности в оцениваемых условиях к максимальной теоретической.

Таким образом, основными факторами, определяющими динамику эксплуатационной произ-

водительности экскаваторов, являются срок эксплуатации и техническая надежность, прочностные характеристики пород, сочетание с автосамосвалами, организация работ, учитывающая, время экскаваторного цикла и обмена автосамосвалов в забое, длина экскаваторных блоков панелей, характеристики климата.

Производительность автосамосвала

С целью оперативного прогнозирования производительности горно-транспортного и экскаваторно-автомобильного комплекса, включающего один гидравлический или электрический экскаватор и несколько автосамосвалов одной модели, приведенный подход по определению производительности экскаваторов был распространен и на автосамосвалы.

При этом системный учет факторов, определяющих производительность каждого автосамосвала в динамике развития открытых горных работ [14, 15], с учетом постоянного роста их глубины и усложнения транспортных схем карьеров [16], изменения при эксплуатации машин топлива или энергии [17-19], технической надежности и временного влияния сурового климата по различным периодам года [20, 21], перспективного применения роботизированных машин различных трансмиссий [22] потребовал установления дополнительных зависимостей.

Так, для системного учета факторов, определяющих годовую производительность автосамосвала $Q_{\text{a.год}}$, т/год, предложено использовать формулу

$$Q_{\text{a.год}} = \frac{q \cdot K_{\text{и.а}} \cdot T \cdot n \cdot N_{\text{а.дн}}}{0,5 \cdot (L_{\text{тр}} + L_{\text{п}}) / V_{\text{ср}} + t_0}, \quad (6)$$

где q – грузоподъемность автосамосвала, т; $K_{\text{и.а}}$ – коэффициент использования автосамосвала во времени на чистой работе; T – продолжительность смены, ч; n – число рабочих смен в сутки; $N_{\text{а.дн}}$ – число рабочих дней автосамосвала в году; $L_{\text{тр}}$ – среднегодовое расстояние транспортирования в грузовом направлении, км; $L_{\text{п}}$ – среднегодовое расстояние транспортирования в порожнем направлении, км; $v_{\text{ср}}$ – средняя техническая скорость движения автосамосвала, км/ч; t_0 – суммарная продолжительность простоев в течение транспортного цикла автосамосвала (загрузка, разгрузка, маневры), ч.

Соответственно, среднемесячная эксплуатационная производительность автосамосвала $Q_{\text{а.мес}}$, т/мес., составит

$$Q_{\text{а.мес}} = \frac{Q_{\text{а.год}}}{12}. \quad (7)$$

С учетом этого для любого оцениваемого периода времени эксплуатационную производи-

тельность автосамосвала $Q_{\text{а}}$, т, предложено определять по формуле

$$Q_{\text{а}} = Q_{\text{а.макс}} \cdot \left(\frac{1 - Y_{\text{а1}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{\text{а2}}}{100} \right) \times \left(\frac{1 - Y_{\text{а3}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{\text{а4}}}{100} \right) \cdot \left(\frac{1 - Y_{\text{а5}}}{100} \right), \quad (8)$$

где $Q_{\text{а.макс}}$ – максимальная теоретическая производительность автосамосвала, т; $Y_{\text{а1}}$ – уровень снижения производительности автосамосвала в зависимости от технической надежности в течение срока эксплуатации, %; $Y_{\text{а2}}$ – уровень снижения производительности автосамосвала в зависимости от расстояния транспортирования, %; $Y_{\text{а3}}$ – уровень снижения производительности автосамосвала в зависимости от сопротивления движению, %; $Y_{\text{а4}}$ – уровень снижения производительности автосамосвала в зависимости от простоев по организационным причинам, %; $Y_{\text{а5}}$ – уровень снижения производительности автосамосвала в зависимости от влияния сурового северного климата, %.

Полученные результаты обобщены в численном виде (табл. 3).

Уровень снижения производительности автосамосвала представляет отношения его фактической производительности в оцениваемых условиях к максимальной теоретической.

В связи с этим транспортную работу автосамосвала для любого оцениваемого периода в технологическом грузопотоке A , т·км, можно рассчитать по выражению

$$A = Q_{\text{а}} \cdot L, \quad (9)$$

где L – расстояние транспортирования горной массы (руды и вскрыши) в периоде.

Таким образом, основными факторами, ограничивающими эксплуатационную производительность автосамосвалов при сочетании с экскаватором, являются срок эксплуатации и техническая надежность, схема организации погрузочно-разгрузочных работ, расстояние транспортирования, уклон и состояние автодорог, характеристики сурового северного климата.

Полученные результаты исследований показывают влияние этих факторов для возможных условий открытой разработки рудных месторождений.

Таблица 3. Динамика уровня снижения производительности автосамосвала в зависимости от различных показателей условий разработки, %

Table 3. Trend in the reduction in productivity of a dump truck depending on various indicators of mining conditions, %

Показатели	Значения					
	1-3	3-5	5-8	8-10	—	—
T_a , лет	1-3	3-5	5-8	8-10	—	—
Y_{a1} , %	0-15	15-29	29-57	57-75	—	—
L , км	0,5-1	1-2	2-3	3-5	5-7	7-10
Y_{a2} , %	0-31	31-57	57-69	69-80	80-85	85-90
ω , %	2-4	4-6	6-8	8-12	12-16	16-20
Y_{a3} , %	0-9	9-14	14-17	17-21	21-23	23-25
t_o , мин	3-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
Y_{a4} , %	0-28	28-61	61-70	70-77	77-81	81-84
M_a	май-октябрь	апрель, ноябрь	декабрь-март	—	—	—
Y_{a5} , %	0-10	10-15	15-20	—	—	—

Выбор модели экскаватора и автосамосвала

Для выбора оптимального варианта структуры технологического комплекса карьерного оборудования, включающего экскаватор, автосамосвалы, буровое, бульдозерное оборудование и оборудование механизации вспомогательных процессов предложено использовать удельные накопленные затраты за срок эксплуатации экскаватора P , руб./м³,

$$P = \frac{\sum_{t=1}^{T_s} (K_t + C_t - A_t - D_t) \cdot 1 / (1 + E)^t}{\sum_{t=1}^{T_s} Q_{st}} \Rightarrow \min, \quad (10)$$

где T_s – срок эксплуатации экскаватора, лет; t – расчетный год; K_t – инвестиции, руб./год; C_t – эксплуатационные затраты, руб./год; A_t – амортизационные отчисления оборудования, руб./год; D_t – остаточная стоимость оборудования, руб./год; E – норма дисконта, %; Q_{st} – производительность комплекса, базовой машиной у которого является экскаватор, м³/год.

Входящие в состав формулы (10) затраты и отчисления включают годовые значения по оцениваемому экскаватору, автосамосвалам, буровому и прочему вспомогательному оборудованию.

Следует отметить, что приведенный критерий не учитывает уровень формируемых доходов по годам эксплуатации машин. Однако вполне отражает условия их эксплуатации и

возможности работы в определенных породах, экономически характеризуя обстоятельства перехода денежных средств в состояние горной массы, экскавируемой из массива и перемещаемой на необходимое расстояние, дополнительность позволяет принимать решения при планировании горных работ [22, 23].

В качестве примера использования предлагаемой методики выполнена оценка вариантов горнотранспортных комплексов, включающих автосамосвалы Komatsu 830E и экскаваторы Komatsu 2800 XPC, PC 5500 D. По данным производителя нормативный срок эксплуатации экскаватора Komatsu 2800 XPC (тросовый) составляет 20 лет, а Komatsu PC 5500 D (дизель-гидравлический) – 10 лет. В течение этого периода уровень эксплуатационных затрат на ремонт и техническое обслуживание (как отношение к стоимости приобретения в первом году) изменяется скачкообразно (рис. 1, а-в). Это связано с периодичностью и затратами на проведение ремонтов и обслуживания.

При этом увеличение расстояния приводит к закупке дополнительных автосамосвалов. В варианте с гидравлическим экскаватором необходимо его повторное приобретение после десяти лет эксплуатации в связи с износом. Очевидно, что зависимость значений, вычисляемых по формуле (10) от времени работы экскаватора имеет гиперболический вид (рис. 1, г), и в условиях одного карьера во многом определена расстоянием перевозок.

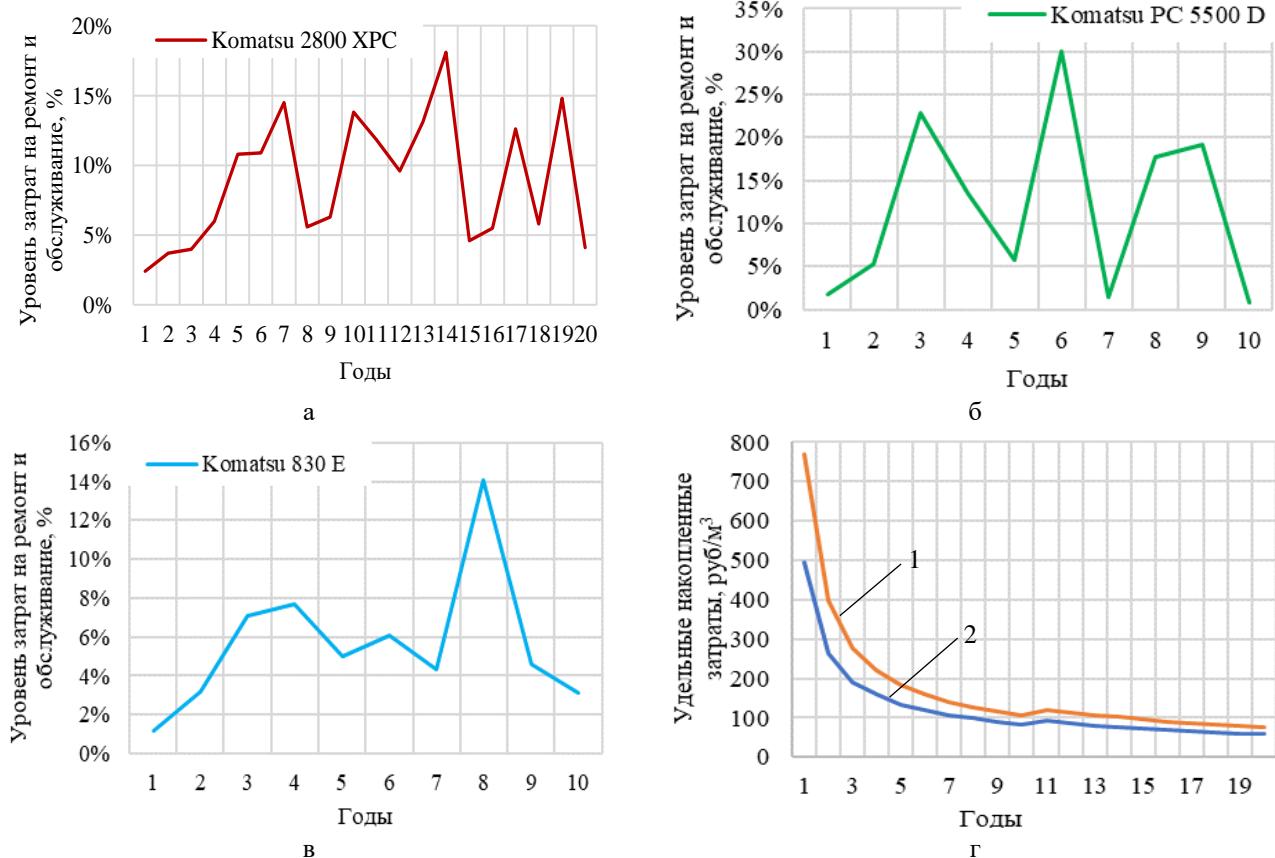


Рис. 1. Временная динамика: а, б, в – уровни эксплуатационных затрат на ремонт и техническое обслуживание экскаваторов Komatsu 2800 XPC, Komatsu PC 5500 D, автосамосвала Komatsu 830 E, отнесенная к его первоначальной стоимости; г – удельные накопленные затраты на приобретение и эксплуатацию экскаваторов Komatsu 2800XPC (кривая 1) и Komatsu PC 5500D (кривая 2) в комплексе с автосамосвалами Komatsu 830E при расстоянии транспортирования 9 км (кривая 1) и 5 км (кривая 2)

Fig. 1. Time trend: a, b, в are operating costs of repair and maintenance of Komatsu 2800 XPC, Komatsu PC 5500 D excavators, Komatsu 830 E dump truck, taken relative to the initial cost; г is accumulated costs per unit for purchasing and operating excavators (1 is Komatsu 2800XPC; 2 is Komatsu PC 5500D) combined with Komatsu 830E dump trucks at the transportation distance (1 is 9 km, 2 is 5 km)

Заключение

Таким образом, выбор экскаватора с канатным и гидравлическим перемещением ковша для сопоставительных условий карьеров Севера необходимо осуществлять в сочетании с автосамосвалами с учетом формируемых затрат, взаимосвязанных характеристик машин, параметров месторождений и климата. Приведенные критерии взаимосвязаны и дополняют друг друга. При этом направлены на оценку технического совершенства машин и расширение границ разработки месторождений.

Список источников

- Кузнецов Д.В., Косолапов А.И. Оптимизация параметров технологических комплексов рудных карьеров: монография. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. 188 с.

- Burt C.N., Caccetta L. Equipment Selection for Mining: With Case Studies. Cham: Springer International Publishing, 2018. 155 p.
- Сытченко В.Н. Сопоставительный выбор экскаваторов типа «механическая лопата» с канатным и гидравлическим перемещением рабочего органа // Горное дело. 2014. № 1. С. 14-22.
- Комленович Д. Многокритериальный подход к выбору горного оборудования // Горное дело. 2017. № 2. С. 10-19.
- Kumykova T.M., Kumykov V.K. Method of Shaping Loading-and-Transportation System in Deep Open Pit Complex Ore Mines. // J. Min. Sci. 2018. No. 53. Pp. 708-717. DOI: 10.1134/S1062739117042702.
- Kolesnikov V., Katsubin A., Martyanov V., Dopr A. Features of the Excavation and Loading Equipment of Various Types in the Development of Inclined and Steep Beds. E3S Web of Conferences, 2019, no. 105, pp. 1-5. DOI: 10.1051/e3sconf/201910501023.

7. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Economic and technological aspects of interrelation between open pit depth and mining transport parameters. *Izvestia vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020, no. 3, pp. 87-95. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-87-95.
8. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Research of the influence of the excavating and automotive equipment complexes parameters on the speed of faces advance // *Earth and Environmental Science*. 2021. No. 626. Pp. 1-6. DOI: 10.1088/1755-1315/626/1/012020.
9. Подэрни Р.Ю. Мировой рынок поставок современного выемочно-погрузочного оборудования для открытых горных работ // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015. № 2. С. 148-167.
10. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Производственные процессы. М.: Либроком, 2010. 512 с.
11. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Технология и комплексная механизация. М.: Либроком, 2010. 551 с.
12. Кулешов А.А. Мощные экскаваторно-автомобильные комплексы. М.: Недра, 1980. 317 с.
13. Горное дело: Терминологический словарь / К.Н. Трубецкой, Д.Р. Каплунов и др. М.: ИПКОН РАН, 2016. 635 с.
14. Журавлев А.Г. Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 3-1. С. 583-601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601.
15. Koptev V.Yu. Justification of choosing an effective model of a dump truck // *Modern Engineering and Technology*. 2014. No. 5. Pp. 23-25.
16. Parhizkar A. Location theory applied to optimize the position of road exit(s) in open pit mining (case study). // *Arabian Journal of Geosciences*. 2018. Vol. 11. Pp. 796-797. DOI: 10.1007/s12517-018-4165-3
17. Jin C., Yi T., Shen Y., Khajepour A., Meng Q. Comparative study on the economy of hybrid mining trucks for open-pit mining // *IET Intelligent Transport Systems*. 2019. No. 13 (1). Pp. 201-208. DOI: 10.1049/iet-its.2018.5085.
18. Liu G., Chai S. Optimizing open-pit truck route based on minimization of time-varying transport energy consumption // *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. No. 1. Pp. 1-12. DOI: 10.1155/2019/6987108.
19. Baiany D.M., Zhang L., Xia X. An Optimization Approach for Shovel Allocation to Minimize Fuel Consumption in Open-pit Mines: Case of Heterogeneous Fleet of Shovels // *IFAC Papers On Line*. 2019. No. 52 (14). Pp. 207-212. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.09.196.
20. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Justification criteria for open pit mine depth and mining/haulage machinery parameters // *Earth and Environmental Science*. 2019. No. 626. Pp. 1-4. DOI: 10.1088/1755-1315/626/1/012038.
21. Smirnov K.A. Simulation of rectilinear motion of a four-wheel car-like robot with an electromechanical drivetrain // *Mechanisms and Machine Science*. 2019, no. 73, pp. 2671-2679. DOI: 10.1007/978-3-030-20131-9_264.
22. Upadhyay S.P., Tabesh M, Moradi Afrapoli A, Askari-Nasab H. A Simulation-based algorithm for solving surface mines, equipment selection and sizing problem under uncertainty // *CIM Journal*. 2021. Vol. 12. Pp. 36-46. DOI: 10.1080/19236026.2021.1872995.
23. JoshiD, Paithankar A, Chatterjee S, Equeenuddin Sk. Integrated Parametric Graph Closure and Branch-and-Cut Algorithm for Open Pit Mine Scheduling under Uncertainty // *Mining*. 2022. No. 2. Pp. 32-51. DOI: 10.3390/mining2010003.

References

1. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. *Optimizatsiya parametrov tekhnologicheskikh kompleksov rudnykh karerov: monografiya* [Optimization of parameters of ore open-cast mine technological complexes: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2020. 188 p. (In Russ.)
2. Burt C.N., Caccetta L. Equipment selection for mining: with case studies. Cham: Springer International Publishing, 2018. 155 p.
3. Sytenkov V.N. Comparative selection of mechanical shovel excavators with rope and hydraulic movement of the operating element. *Gornoe delo* [Mining Engineering], 2014, no. 1, pp. 14-22. (In Russ.)
4. Komlenovich D. A multi-criteria approach to choosing mining equipment. *Gornoe delo* [Mining Engineering], 2017, no. 2, pp. 10-19. (In Russ.)
5. Kumyкова T.M., Kumykov V.K. Method of shaping loading-and-transportation system in deep open pit complex ore mines. *J. Vin. Sci.*, 53, 708-717 (2018). DOI: 10.1134/S1062739117042702
6. Kolesnikov V., Katsubin A., Martyanov V., Dopr A. Features of the excavation and loading equipment of various types in the development of inclined and steep beds. *E3S Web of Conferences*, 105, 1-5 (2019). DOI: 10.1051/e3sconf/201910501023
7. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Economic and technological aspects of interrelation between open pit depth and mining transport parameters. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of Higher Institutions. Mining Journal], 2020, no. 3, pp. 87-95. DOI: 10.21440/0536-1028-2020-3-87-95
8. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Research of the influence of the excavating and automotive equipment complexes parameters on the speed of faces advance. *Earth and Environmental Science*, 626, 1-6 (2021). DOI: 10.1088/1755-1315/626/1/012020
9. Poderni R.Yu. World market of advanced extraction-and-loading machines for open pit mining. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2015, no. 2, pp. 148-167. (In Russ.)
10. Rzhevsky V.V. *Otkryte gornye raboty. Proizvodstvennye protsessy* [Open-pit mining. Production processes]. Moscow: Librokom, 2010, 512 p. (In Russ.)
11. Rzhevsky V.V. *Otkryte gornye raboty. Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizatsiya* [Open-pit mining.

- Technology and integrated mechanization]. Moscow: Librokom, 2010, 551 p. (In Russ.)
12. Kuleshov A.A. *Moshchnye ekskavatorno-avtomobilnye kompleksy* [Powerful excavator-vehicle complexes]. Moscow: Nedra, 1980, 317 p. (In Russ.)
13. Trubetskoy K.N., Kaplunov D.R. et al. *Gornoe delo: Terminologicheskiy slovar* [Mining: Dictionary of technical terms]. Moscow: Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, 2016, 635 p. (In Russ.)
14. Zhuravlev A.G. The issues of optimizing parameters of quarry transport systems. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2020, no. 3-1, pp. 583-601. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-583-601
15. Koptev V.Yu. Justification of choosing an effective model of a dump truck. *Modern Engineering and Technology*, 5, 23-25 (2014).
16. Parhizkar A. Location theory applied to optimize the position of road exit(s) in open pit mining (case study). *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 796-797 (2018). DOI:10.1007/s12517-018-4165-3
17. Jin C., Yi T., Shen Y., Khajepour A., Meng Q. Comparative study on the economy of hybrid mining trucks for open-pit mining. *IET Intelligent Transport Systems*, 13 (1), 201-208 (2019). DOI: 10.1049/iet-its.2018.5085
18. Liu G., Chai S. Optimizing open-pit truck route based on minimization of time-varying transport energy consumption. *Mathematical Problems in Engineering*, 1, 1 – 12 (2019). DOI: 10.1155/2019/6987108
19. Baiany D.M., Zhang L., Xia X. An optimization approach for shovel allocation to minimize fuel consumption in open-pit mines: Case of heterogeneous fleet of shovels. *IFAC Papers OnLine*, 52 (14), 207-212 (2019). DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.09.196
20. Kuznetsov D.V., Kosolapov A.I. Justification criteria for open pit mine depth and mining/haulage machinery parameters. *Earth and Environmental Science*, 262, 1-4 (2019). DOI: 10.1088/1755-1315/262/1/012038
21. Smirnov K.A. Simulation of rectilinear motion of a four-wheel car-like robot with an electromechanical drivetrain. *Mechanisms and Machine Science*, 73, 2671-2679 (2019). DOI: 10.1007/978-3-030-20131-9_264
22. Upadhyay S.P., Tabesh M., Moradi Afrapoli A., Askari-Nasab H. A simulation-based algorithm for solving surface mines, equipment selection and sizing problem under uncertainty. *CIM Journal*, 12, 36-46 (2021). DOI: 10.1080/19236026.2021.1872995
23. Joshi D., Paithankar A., Chatterjee S., Equeenuddin Sk. Integrated parametric graph closure and branch-and-cut algorithm for open pit mine scheduling under uncertainty. *Mining*, 2, 32-51 (2022). DOI: 10.3390/mining2010003

Поступила 29.06.2022; принята к публикации 04.07.2022; опубликована 26.09.2022
Submitted 29/06/2022; revised 04/07/2022; published 26/09/2022

Кузнецов Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Открытые горные работы», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: KuznetsovDV@mail.ru.

Косолапов Александр Иннокентьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Открытые горные работы», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.
Email: Kosolapov1953@mail.ru.

Dmitriy V. Kuznetsov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Opencast Mining Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: KuznetsovDV@mail.ru.

Alexander I. Kosolapov – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Opencast Mining Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.
Email: Kosolapov1953@mail.ru.