

УДК 622.684

## ГРАНИЧНЫЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРИМЕНИМОСТИ ФРОНТАЛЬНЫХ ПОГРУЗЧИКОВ ПРИ РАБОТЕ В КАЧЕСТВЕ ВЫЕМОЧНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Журавлев Артём Геннадиевич<sup>1</sup>,  
juravlev@igduran.ru

Черных Владимир Владимирович<sup>1</sup>,  
chernyh@igduran.ru

<sup>1</sup> Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук,  
Россия, 620219, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58.

**Актуальность** повышения эффективности разработки месторождений полезных ископаемых требует приближения наиболее экономичного магистрального транспорта к рабочей зоне карьера. При многоэтапной разработке сложноструктурных месторождений глубокими карьерами с относительно небольшими их размерами в плане (примерами служат золоторудные, меднорудные, алмазорудные карьеры) может быть целесообразным объединить функции выемки и транспортирования в одной машине.

**Цель:** определение граничных технико-экономических показателей погрузчиков при использовании в качестве выемочно-транспортных машин. Граничными являются показатели экскаваторно-автомобильного комплекса в идентичных условиях.

**Объекты:** современные высокопроизводительные погрузчики с вместимостью ковша 10–40 м<sup>3</sup> при грузоподъемности рабочего оборудования 20–72 т и мощностью двигателя от 521 до 1715 кВт, экскаваторно-автомобильный комплекс на базе электромеханических экскаваторов-мехлопат с вместимостью ковша 12 м<sup>3</sup> и автосамосвалов БелАЗ-7513 грузоподъемностью 136 т.

**Методы.** Расчёты технико-экономических показателей выполнены по известным методикам, описанным в научно-технической литературе, для машин циклического действия и фронтальных погрузчиков. Условия работы оборудования, принятые при расчётах, находятся в диапазоне рациональных для экскаваторно-автомобильного комплекса, что позволяет максимально эффективно сравнить их с фронтальными погрузчиками.

**Результаты.** Обобщены расчетные данные о производительности, себестоимости выемочно-доставочных работ погрузчиками в зависимости от дальности транспортирования, высоты подъема, годовой производительности по горной массе с учетом типоразмера погрузчиков (вместимости ковша). Выявлены граничные параметры предпочтительных условий применения погрузчиков в качестве выемочно-транспортных машин в сравнении с экскаваторно-автомобильными комплексами. Сделан вывод о целесообразности продолжения исследований по обоснованию параметров специальных выемочно-транспортных машин.

### Ключевые слова:

Сборочный карьерный транспорт, фронтальный погрузчик, выемочно-транспортная машина, технико-экономические показатели, экскаваторно-автомобильный комплекс.

### Введение

Необходимость повышения эффективности разработки месторождений полезных ископаемых требует приближения параметров транспорта к значениям, обеспечивающим минимальный уровень затрат на всем жизненном цикле [1, 2].

Развитие инновационных решений [3] позволит достичь более высокой эффективности при магистральном транспортировании горной массы. В конечном итоге эти требования сводятся к максимальному приближению магистрального звена транспортной системы к рабочей зоне, что сокращает плечо откатки для сборочного звена транспорта. Сборочное же звено сегодня практически безальтернативно формируется на базе автомобильного транспорта, который характеризуется высокими эксплуатационными затратами.

Учитывая вышесказанное, в условиях стесненной рабочей зоны при отработке глубинной части карьера возникает необходимость совмещения функций выемочно-погрузочного и транспортного оборудования в одном комплексе. Такой комплекс может быть реализован на базе специальных выемочно-транспортных машин (ВТМ), способных осуществлять как выемку

горной массы в забое, так и ее транспортирование на расстояние до 2–3 км.

Сравнение технологических особенностей ВТМ и экскаваторно-автомобильного комплекса (ЭАК) приведено в таблице.

ВТМ ввиду объединения функций будут по предварительным оценкам иметь значительную массу, а значит, и больший коэффициент тары в сравнении с карьерными автосамосвалами, что ограничивает экономически эффективное расстояние. Поэтому данные машины должны использоваться в качестве сборочного звена с последующей перегрузкой в магистральный транспорт, например: стационарный подъемник [3], автопоезд, работающий на доставке по тоннельным съездам [4] и т. п.

Разработка компоновочных решений ВТМ и прогнозирование их технико-экономических показателей для оценки области применения является трудоемкой задачей. Поэтому на предварительном этапе важно выполнить укрупненную оценку возможного эффекта от применения такого типа машин в сравнении с традиционной технологией, базирующейся на экскаваторно-автомобильных комплексах (ЭАК).

**Таблица.** Сравнение технологических особенностей выемочно-транспортных машин и экскаваторно-автомобильного комплекса

**Table.** Comparison of technological features of excavation and transport machines and excavator and automobile complex

Свойство, фактор Property, factor	Выемочно-транспортная машина (прототип – фронтальный погрузчик) Excavation and transportation machine (prototype – front loader)	Экскаваторно-автомобильный комплекс Excavator-automobile complex
Полные затраты Total costs	Ниже, чем на ЭАК, при небольших расстояниях в связи с: 1) отсутствием необходимости проводить кабельную инфраструктуру; 2) отсутствием дорогостоящего экскаватора Lower than for EAC on small distances due to the absence of: 1) need to provide cable infrastructure; 2) expensive excavator.	Ниже, чем на ВТМ, при номинальной производительности в связи: 1) высокой единичной производительностью машин; 2) оптимальным коэффициентом тары автосамосвалов и тягово-динамических характеристик для транспортирования. Lower than for ETM with nominal productivity due to: 1) high unit productivity of machines; 2) optimal coefficient of dump truck containers and traction-dynamic characteristics for transportation
Зависимость удельной себестоимости (р./т, р./м <sup>3</sup> ) от объема выемки Dependence of the unit cost (rub/t, rub/m <sup>3</sup> ) on the volume of excavation	Высокая: при значительных объемах себестоимость существенно возрастает в связи с пропорциональным ростом количества машин, операторов, гаражно-ремонтного хозяйства High: with significant volumes the cost increases significantly due to the proportional increase in the number of machines, operators, garage repair facilities	Возрастает при падении объемов в связи с непродуктивным использованием оборудования и уменьшается с выходом на расчетную производительность Increases at volume reduction due to unproductive use of equipment and decreases with the output volume of the calculated productivity
Производительность Efficiency	Ограничена в связи с: 1) совмещением функций в одной машине и сложностью варьировать технические параметры под изменяющиеся горнотехнические условия; 2) невысокой скоростью движения. Limited due to: 1) combination of functions in one machine and the difficulty of varying their technical parameters for changing mining conditions; 2) restricted travelling speed.	1) Обеспечивается оптимум технической производительности комплекса за счет разделения функций экскавации и транспортирования. 2) Можно отдельно подобрать рациональные по технологическим параметрам и производительности машины. 1) Optimum technical performance of the complex is ensured by separating the functions of excavation and transportation. 2) It is possible to select machines separately, rational in terms of technological parameters and machine performance.
Ограничения по конструктивным особенностям Limitations on design features	1) Высокий коэффициент тары в связи с конструктивным совмещением функций выемочной и транспортной машин. 2) Ограниченная скорость в связи с необходимостью экономичной работы в режиме выемки из забоя при значительной силе тяги (либо необходимость установки КПП, что увеличивает коэффициент тары и стоимость) 1) High payload ratio due to the constructive combination of the functions of the dredging and transport machines. 2) Limited speed due to the need for economical operation in the dredging mode with a significant thrust force (or the need to install a gearbox, which increases the payload ratio and costs).	Низкая скорость перемещения экскаватора Low speed of excavator movement
Безопасность Safety	Выше, чем для экскаваторов, в связи с отсутствием постоянно находящихся машин в забое, высокой динамикой машин, их способностью оперативно выйти из опасной зоны Higher due to the absence of permanently located machines in the face, high dynamics of machines, and the ability to quickly get out of the danger zone	Низкая при ведении выемки в забоях в опасных условиях (зоны с низкой устойчивостью, формирование совмещенных уступов в стесненных условиях и др.) Low when excavating in the faces with dangerous conditions (zones of low stability, formation of combined ledges in confined spaces, etc.)
Технологическая гибкость при многозабойной селективной выемке Technological flexibility in multi-face selective excavation	Высокая адаптивность в связи с возможностью прибытия ВТМ в любой забой в каждый из рейсов. Возможность селективной выемки, в том числе в пределах каждого забоя, включая отработку пропластков, приконтурной зоны High adaptability due to the possibility of arrival of ETM in any face in each of the hauls. Possibility of selective excavation, including within each face, embracing the development of interlayers and of the contour zone	Низкая в связи с длительностью операций перегона, необходимостью держать соответствующее количество экскаваторов в рабочей зоне при необходимости шихтовки. Селективная выемка более качественно осуществляется гидравлическими экскаваторами Low adaptability due to the duration of the ferrying operations, the need to keep an appropriate number of excavators in the working area if blending is necessary. Selective excavation is carried out more efficiently by hydraulic excavators

Фундаментальные труды по технологии, экономической эффективности и области применения фронтальных колесных погрузчиков выполнены К.Н. Трубецким [5]. В части использования погрузчиков с вместимостью ковша до  $10 \text{ м}^3$  в качестве выемочно-доставочных машин установлены условия их эффективного применения в сравнении с экскаваторно-автомобильными комплексами, характеризующиеся следующими параметрами:

- дальность транспортирования в зависимости от типа и качества дорожного покрытия до 800–1500 м;
- годовой объем перевозок до 3 млн т.

Учитывая значительное развитие конструкций фронтальных погрузчиков за последние три десятилетия, в частности постановку на серийное производство погрузчиков с ковшами  $20\text{--}40 \text{ м}^3$ , указанные данные требуют актуализации и расширения охватываемого типоразмерного ряда.

Данные современных исследований [6–17] показывают, что погрузчики позволяют обеспечить преимущества перед экскаваторами в ряде случаев: при ограниченной производственной программе, высоких требованиях к селективности выемки, специфических условиях ведения выемочных работ, требующих высокой мобильности. Хотя чаще всего погрузчики применяются на рудных складах для погрузки транспорта или выемки из штабелей и загрузки в приемные бункеры ДОФ руды. Большой объем современных работ [8, 11, 13, 14], публикуемых в печати, ориентирован на совершенствование конструкций погрузчиков, обеспечивающих экономичность, производительность, надежность и долговечность, а также автоматизацию с выходом на полную автономность (роботизацию). Это создает основы для дальнейшего

улучшения технико-экономических показателей погрузчиков.

Таким образом, имеющиеся в научно-технической литературе данные не позволяют однозначно определить целесообразность применения ВТМ, учитывая оборудование их ковшами или грузовыми платформами большой вместимости  $40\text{--}60 \text{ м}^3$ . Это требует проведения специальных расчетов.

#### Методы исследования

Для оценки были выполнены технико-экономические расчеты, в которых в качестве прототипа выбраны современные крупнотоннажные погрузчики с вместимостью ковша  $10\text{--}40 \text{ м}^3$  при грузоподъемности рабочего оборудования  $20\text{--}72 \text{ т}$  (рис. 1).

Производительность погрузчиков рассчитывалась исходя из времени на операции наполнения ковша, разгрузки, определенного по данным хронометражных наблюдений, а также времени движения, рассчитанного исходя из тягово-динамической характеристики каждого конкретного погрузчика.

Экономические расчеты выполнены в ценах 2020 г. Методика расчета и базовые закономерности приведены в работах [18, 19]. В качестве базового варианта принят ЭАК, состоящий из электромеханических экскаваторов-мехлопат с вместимостью ковша  $12 \text{ м}^3$  и автосамосвалов БелАЗ-7513 грузоподъемностью 136 т. Эксплуатационные показатели работы карьерных автосамосвалов определялись на основе компьютерного моделирования. Расчеты по всем вариантам выполнены для рудных карьеров, разрабатываемых по углубочной системе. Насыпная плотность горной массы после взрывания принята  $2\text{--}2,2 \text{ т/м}^3$ . Выемка валовая.



Рис. 1. Технологическая схема работы выемочно-доставочного комплекса на базе фронтальных колесных погрузчиков  
Fig. 1. Technological scheme of the work of the removal and delivery complex based on front wheel loaders

#### Результаты и их анализ

Первичный анализ построен на установлении закономерностей технико-экономических показателей фронтальных погрузчиков, используемых в режиме ВТМ от основных горнотехнических факторов: расстояния транспортирования, высоты подъема, объема перемещаемой горной массы. На рис. 2 приведены зависимости технической производительности погрузчиков с разной вместимостью ковша. Видно, что с ростом расстояния производительность существенно падает (например, в диапазоне расстояний от 0,5 до 1 км в 2 раза), что объясняется ограниченной максимальной технической скоростью движения. Влия-

ние высоты подъема не столь существенно ввиду значительной удельной мощности.

Себестоимость функционирования погрузчиков различного типоразмера в режиме ВТМ, приведенная к 1 т горной массы, представлена на рис. 3. Видно, что затраты растут пропорционально расстоянию и высоте подъема, при этом в области наиболее вероятного экономического преимущества погрузчиков при дальности транспортирования  $0,5\text{--}2 \text{ км}$  себестоимость составляет  $20\text{--}75 \text{ р./т}$ . При малых расстояниях и значительной высоте подъема, соотношение которых определяется средневзвешенным уклоном трассы транспортирования  $7\text{--}9 \%$  (уклон съездов до  $12 \%$ ), себестоимость резко возрастает, что отражено на графиках рис. 3 возрастающей кривой.

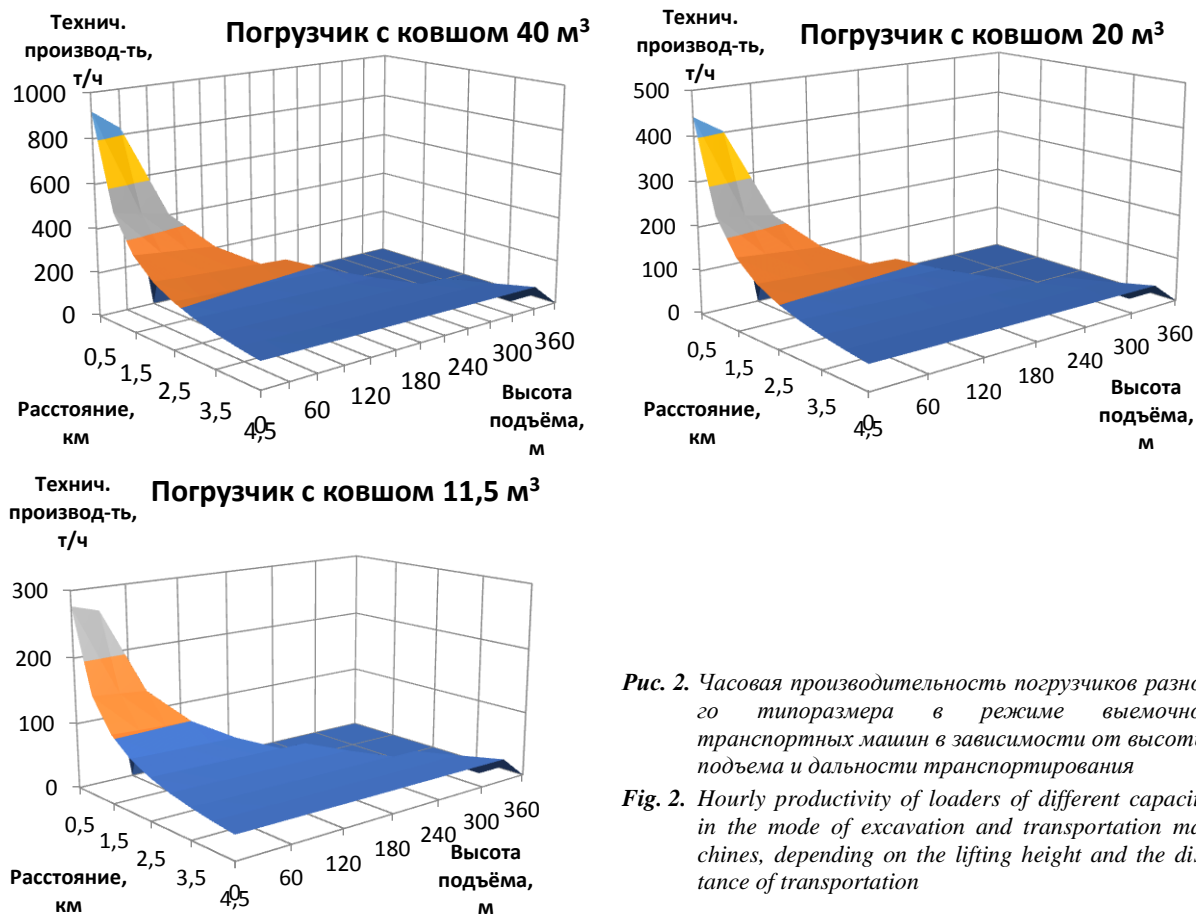


Рис. 2. Часовая производительность погрузчиков разного типоразмера в режиме выемочно-транспортных машин в зависимости от высоты подъёма и дальности транспортирования

Fig. 2. Hourly productivity of loaders of different capacity in the mode of excavation and transportation machines, depending on the lifting height and the distance of transportation

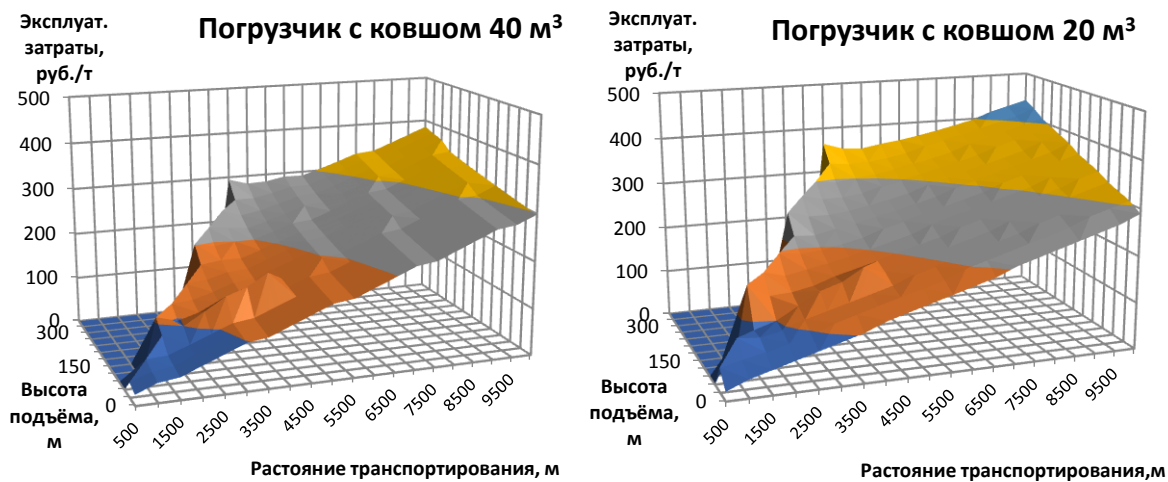
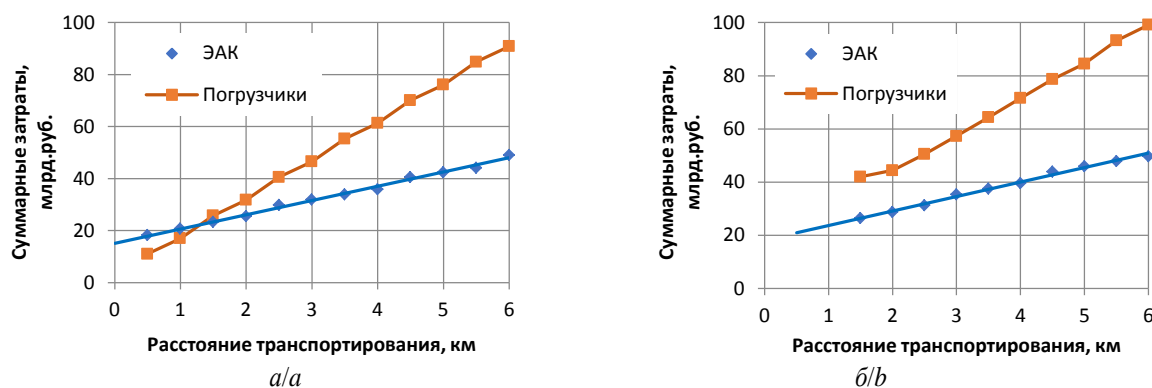


Рис. 3. Зависимость эксплуатационных затрат на работу погрузчиков от условий транспортирования

Fig. 3. Dependence of operating costs for the work of loaders on the conditions of transportation

Вторая часть исследования построена на сопоставлении затрат по вариантам «ЭАК» и «Погрузчики». Себестоимость экскавации для варианта «ЭАК» принималась 48 р./м<sup>3</sup>. Из рис. 4 видно, что существует область, где затраты на погрузчики ниже, чем на ЭАК. Она характеризуется расстоянием транспортирования до 1,0–1,3 км и высотой подъёма не более 60–65 м в зависимости сопутствующих факторов. По результатам расчетов отмечено, что с ростом высоты подъёма за-

траты по варианту применения погрузчиков растут в сравнении с ЭАК, а эффективное расстояние уменьшается. При высотах более 70–80 м не наблюдается пересечения с кривой затрат ЭАК, то есть транспортирование погрузчиками при любом расстоянии затратнее (рис. 4, б). Это объясняется существенным ростом затрат на горюче-смазочные материалы ввиду работы энергосиловой установки в сильно нагруженном режиме в условиях повышенных уклонов.



**Рис. 4.** Сопоставление суммарных затрат на выемку и транспортирование горной массы за 10 лет эксплуатации по вариантам «ЭАК» и «Погрузчики» вместимостью ковша  $40 \text{ м}^3$  при производительности 10 млн т/год (капитальные + эксплуатационные затраты без дисконтирования) при высоте подъема: а) 0 м; б) 90 м

**Fig. 4.** Comparison of the total costs of excavation and transportation of rock mass for 10 years of operation according to the variants «EAC» (excavator and automobile complex) and «Loaders» with a bucket capacity of  $40 \text{ м}^3$  at a productivity of 10 million tons/year (capital + operating costs without discounting) at a lifting height of: а) 0 m; б) 90 m

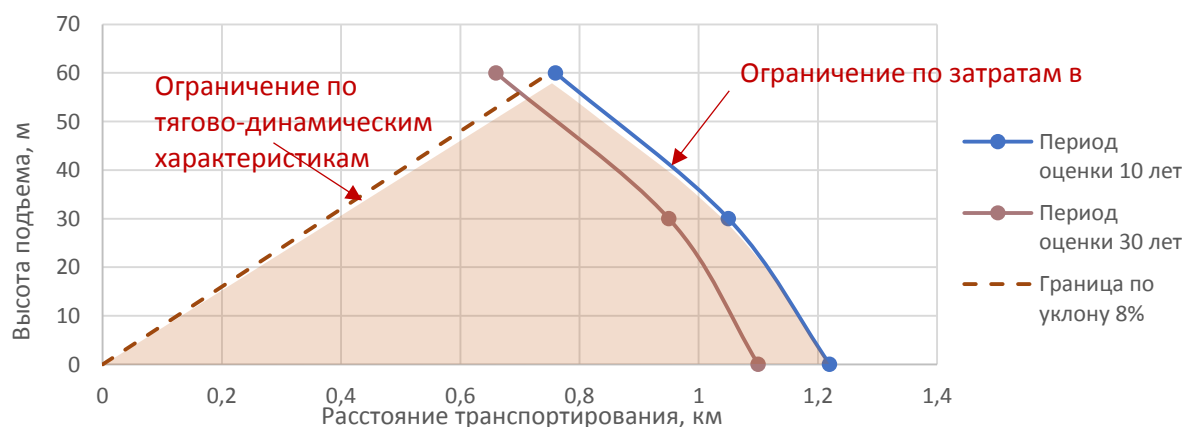
Следовательно:

- при создании специализированных ВТМ необходимо обеспечить экономичный режим работы не только на малых, но и на стандартных для транспортных съездов уклонах при длительном движении;
- применение ВТМ рационально в ограниченной рабочей зоне в пределах 2–4 горизонтов по высоте с последующей перегрузкой в магистральный транспорт.

Обработка результатов расчетов и обобщение точек пересечения по совокупности графиков, аналогичных рис. 4, для множества высот подъема, дальности транспортирования и периода оценки позволило отобразить графически область технико-экономического преимущества погрузчиков, эксплуатируемых в качестве выемочно-доставочных машин, в сравнении с ЭАК (рис. 5). Сверху область ограничена тягово-динамическими характеристиками и определяется предельным уклоном, при котором погрузчик способен двигаться с рабочей скоростью (не ниже 8–10 км/ч) с приемлемым коэффициентом полезного действия трансмиссии, который существенно падает при значительной силе тяги на колесах. Расчетами установлено,

что средневзвешенный уклон целесообразно ограничить на уровне 8 %, что соответствует руководящему уклону отдельных съездов 10–11 %. Отметим, что ряд погрузчиков по своим характеристикам способны преодолевать больший уклон, однако в этом случае следует рассматривать специальные схемы их работы и сравнивать с соответствующими базовыми вариантами технологических комплексов машин (например, экскаваторы и полноприводные пневмоколесные либо гусеничные самосвалы, способные устойчиво работать на съездах с уклонами до 25 % и более [20]).

Учитывая, что с ростом расстояния затраты на работу погрузчиков существенно растут, предельное расстояние ограничивается уровнем затрат и соответствует кривой равенства затрат между вариантами погрузчиков и ЭАК. Отметим, что период оценки оказывает некоторое влияние на границу по расстоянию транспортирования, что связано с разным уровнем расходов на обновление парка машин (с одной стороны погрузчики, с другой стороны – экскаваторы и автосамосвалы) и разными сроками службы, но кардинально картину не меняет.



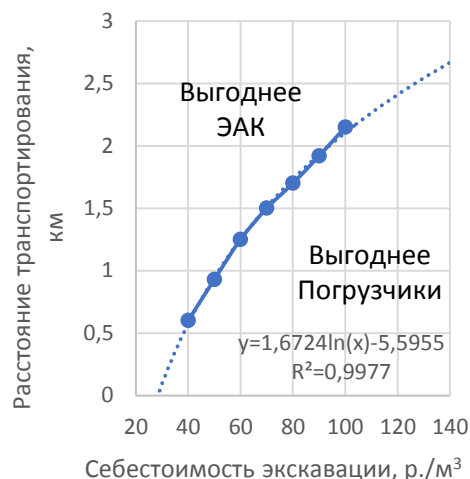
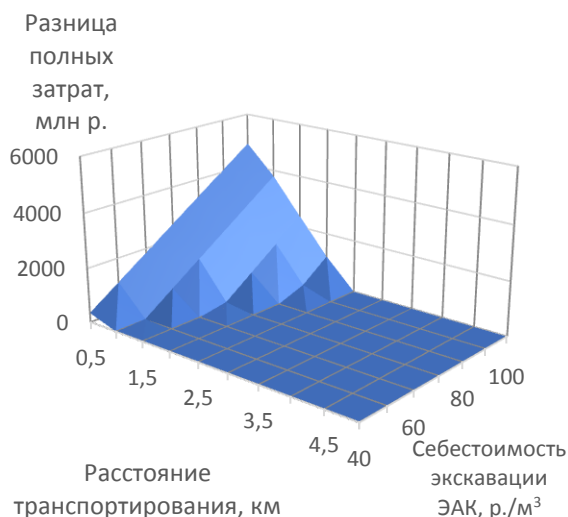
**Рис. 5.** Область эффективного применения погрузчиков с вместимостью ковша  $40 \text{ м}^3$  при грузоподъемности 72 т в качестве погрузочно-доставочных машин

**Fig. 5.** Area of effective use of loaders with a bucket capacity of  $40 \text{ м}^3$  with a load capacity of 72 tons as loading and delivery machines

Заметное влияние на преимущество ВТМ по технико-экономическим показателям оказывает себестоимость экскавации ЭАК. Она в свою очередь зависит от факторов, определяющих эффективную работу ЭАК, прежде всего: годовой производительности, рационального типоразмера экскаваторов применительно к горнотехническим условиям.

На рис. 6 показана разница расчетных затрат на выемку и транспортирование до перегрузки на магистральный транспорт между погрузчиками и ЭАК. Расчет выполнен для объема перевозок 5–10 млн

т/год. Рассматривается разный уровень себестоимости экскавации, что позволяет учесть варианты применяемых экскаваторов (электромеханические, гидравлические, разной вместимости ковша), а также регион (как правило, для удаленных районов с неразвитой инфраструктурой, а также месторождений, обрабатываемых в северных условиях, себестоимость высокая). Видно, что изменение себестоимости экскавации ЭАК от 40 до 100 р./м<sup>3</sup> (в 2,5 раза) обеспечивает рост эффективной дальности транспортирования ВТМ с 0,6 до 2,15 км (в 3,5 раза).



**Рис. 6.** Сокращение суммарных затрат при применении погрузчиков с вместимостью ковша 40 м<sup>3</sup> в сравнении с ЭАК за 10 лет при различной себестоимости экскавации ЭАК, высоте подъема при транспортировании 30 м: а) разница затрат между вариантами «Погрузчики» и «ЭАК»; б) граница эффективного применения погрузчиков

**Fig. 6.** Reduction of total costs when using loaders with a bucket capacity of 40 m<sup>3</sup> in comparison with EAC for 10 years at different cost of EAC excavation, lifting height of 30 m while transportation: a) difference in costs between the variants «Loaders» and «EAC»; b) boundary of the effective use of loaders

Обработка результатов расчетов позволила определить границу области более экономичного применения комплекса погрузчиков с вместимостью ковша 40 м<sup>3</sup> (рис. 6, б). Основной кривой с маркерами точек обозначена расчетная граница, а пунктиром – экстраполяция данной границы (аппроксимирующее уравнение приведено на графике). Видно, что замена ЭАК на погрузчики при себестоимости экскавации ниже 30 р./м<sup>3</sup> неэффективна.

Стоит отметить, что речь в данном случае идет только о сравнительно экономической неэффективности. На практике могут встречаться условия, при которых применение погрузчиков целесообразно по горно-технологическим соображениям, тогда область эффективного применения будет определяться положительным балансом затрат и выручки.

Примененная в расчетах методика не позволяет установить влияние годовой производительности на оптимизацию расходов ЭАК. Поэтому такое влияние оценивалось экспертно по аналогам. Очевидно, что при значительной годовой программе горных работ парк погрузчиков заметно возрастает (равно как и затраты на него), а вот ЭАК, напротив, благодаря выходу на высокую производительность характеризуется

понижением себестоимости на 1 т перемещаемой горной массы. В итоге ограничение на эффективное применение погрузчиков в качестве ВТМ оценивается в 15 млн т/год при области наибольшей эффективности в пределах 2–10 млн т/год.

Отметим, что представленные расчеты для конкретных вариантов без оптимизации:

- погрузчики с вместимостью ковша 40 м<sup>3</sup>;
- ЭАК в составе автосамосвалов грузоподъемностью 136 т и экскаватора-мехлопаты электромеханического с ковшом 12 м<sup>3</sup>.

Поэтому установленная граница экономичного применения погрузчиков в качестве ВТМ является ориентировочной и может смещаться в зависимости от конкретных условий как в сторону сужения, так и в сторону расширения области.

#### Выводы

1. В условиях стесненной рабочей зоны при развитии глубоких карьеров возможно применение технологии с минимизацией дальности транспортирования сборочным транспортом и приближении магистрального транспорта специального типа (канатные подъемники или иное) к рабочей

зоне. Возникает необходимость совмещения функций выемочно-погрузочного и транспортного оборудования в одном комплексе. Такой комплекс может быть реализован на базе специальных выемочно-транспортных машин, способных осуществлять как выемку горной массы в забое, так и транспортирование на расстояние до 2–3 км при незначительной высоте подъема.

2. Установлена укрупненно область эффективного применения современных мощных фронтальных колесных погрузчиков с ковшем 20–40 м<sup>3</sup> в качестве выемочно-транспортных машин при открытой разработке месторождений на незначительное расстояние при ограниченном годовом объеме перевозок. Она характеризуется:

- дальностью транспортирования не более 1,2–2,5 км в зависимости от себестоимости выполнения работ, обусловленной региональными коэффициентами, затратами на доставку материалов, оборудования, запасных частей, стоимостью топлива;
- высотой подъема не более 60–90 м;
- средневзвешенным уклоном трассы не более 8 %;
- годовым объемом работ комплекса до 10–15 млн т.

Отметим, что указаны граничные значения условий применения, наибольшую эффективность погрузчики показывают при дальности транспортирования до 500–1000 м.

3. Технологические условия эффективного применения погрузчиков в качестве ВТМ:

- селективность выемки, необходимость многозабойного усреднения с подшихтовкой или отдельной выдачи руды по сортам;
- необходимость поочередного ведения горных работ на разных горизонтах с частыми перегонами выемочных машин;
- работа в зонах высокой опасности вывалов и обрушений (формирование сверхвысоких уступов, доработка нижних горизонтов при специальных схемах вскрытия (крутонаклонными съездами, тоннельными съездами) и др.

4. Учитывая полученную по результатам расчетов экономию от применения фронтальных погрузчиков на выемочно-транспортных работах целесообразно продолжить исследования и обосновать технические параметры специальных выемочно-транспортных машин, базируясь на требуемых технологических показателях.

Оценку эффективности таких конструктивных и технологических решений необходимо выполнять по технико-экономическим показателям, сопоставляя варианты:

- «только ВТМ» и «экскаваторно-автомобильный комплекс»;
- «только ВТМ» и «комплекс погрузчик-автосамосвал».

*Исследования выполнены в рамках Государственного задания № 075-00412-22 ПР. Методологические основы стратегии комплексного освоения запасов месторождений твердых полезных ископаемых в динамике развития горнотехнических систем (FUWE-2022-0005), рег. № 1021062010531-8-1.5.1*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев В.Л. Исследование переходных процессов – новое направление в развитии методологии комплексного освоения георесурсов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2019. – 284 с.
2. Журавлев А.Г. Вопросы оптимизации параметров транспортных систем карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С. 583–601. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-584-601
3. Чендырев М.А., Журавлев А.Г. Обоснование эффективных условий применения карьерных наклонных канатных подъемников на базе компьютерного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 5-2. – С. 309–321. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-52-0-309.
4. Технологические решения по вскрытию и отработке глубоких горизонтов Нюрбинского карьера АК «АЛРОСА» / А.Н. Акишев, Ю.И. Лель, Д.Х. Ильбульдин, О.В. Мусихина, И.А. Глебов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – № 7. – С. 4–12.
5. Трубецкой К.Н. Технология применения и параметры карьерных погрузчиков. – М.: Недра, 1985. – 264 с.
6. Sebeom Park, Yosoon Choi, Han-su Park. Optimization of truck-loader haulage systems in an underground mine using simulation methods // Geosystem Engineering. – 2016. – V. 19:5. – P. 222–231. DOI: 10.1080/12269328.2016.1176538.
7. Burt C.N., Caccetta L. Match factor for heterogeneous truck and loader fleets, International Journal of Mining // Reclamation and Environment. – 2007. – V. 21:4. – P. 262–270. DOI: 10.1080/17480930701388606.
8. Hassanean S.H.J., Weizhuo Lu, Olofsson Th. Determining the environmental impact of material hauling with wheel loaders during earthmoving operations // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2019. – V. 69. – P. 1195–1214. DOI: 10.1080/10962247.2019.1640805.
9. Чебан А.Ю., Секисов Г.В. Обоснование использования комбинированной подготовки к селективной выемке руд сложноструктурных месторождений // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – № 3. – С. 4–12.
10. Зырянов И.В., Акишев А.Н., Бондаренко И.Ф. Совершенствование добычи и переработки алмазосодержащих руд. – Якутск: ИД СВФУ, 2020. – 720 с.
11. Intelligent maintenance decision system for high speed loader executing agencies based on FT A and FEMCA / F. Wang, Z. Wang, W. Wang, X. Zhang // 2020 IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA). – 2020. – P. 1295–1299. DOI: 10.1109/ICIBA50161.2020.9277429.
12. Site operation strategy for wheel loader/truck loading and transportation cycle / F. Wang, Q. Wen, X. Xu, B. Xu, Z. Sun // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – V. 70. – № 5. – P. 4129–4138. DOI: 10.1109/TVT.2021.3070394.
13. Tebaldi D., Zanasi R. Modeling control and simulation of a power-split hybrid wheel loader // 2021 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED). – 2021. – P. 465–471. DOI: 10.1109/MED51440.2021.9480213.
14. Improving the fuel efficiency of compact wheel loader with a series hydraulic hybrid powertrain / Q. Wen, F. Wang, B. Xu, Z. Sun // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2020. – V. 69. – № 10. – P. 10700–10709. DOI: 10.1109/TVT.2020.3006155.
15. Курехин Е.В. Обоснование технологии разработки взорванных пород с применением выемочно-погрузочных комплексов и автомобильного транспорта для разрезов малой производственной мощности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – № S45-1. – С. 502–518.
16. Singh S.P., Narendrula R. Factors affecting the productivity of loaders in surface mines // International Journal of Mining,

- Reclamation and Environment. – 2020. – V. 20:1. – P. 20–32. DOI: 10.1080/13895260500261574/.
17. Журавлев А.Г., Черных В.В. Техничко-экономические расчеты применения погрузчиков в качестве выемочно-транспортного оборудования карьеров // Проблемы недропользования. – 2021. – № 1. – С. 45–56. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.045.
18. Фурин В.О. Обоснование технологических параметров углубочного комплекса для доработки крутопадающих месторождений: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2009. – 155 с.
19. Журавлев А.Г., Скороходов А.В. К вопросу обоснования производительности экскаваторно-автомобильных комплексов методом компьютерного моделирования // Проблемы недропользования. – 2015. – № 2. – С. 53–60. DOI: 10.18454/2313-1586.2015.02.053
20. Глебов А.В. Технологические особенности освоения месторождений твердых полезных ископаемых с использованием шарнирно-сочлененных самосвалов // Наука и техника. – 2018. – Т. 17. – № 3. – С. 238–245. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-3-238-245.

*Поступила: 14.01.2022 г.*

#### **Информация об авторах**

**Журавлев А.Г.**, кандидат технических наук, заведующий лабораторией транспортных систем карьеров и геотехники Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук.

**Черных В.В.**, младший научный сотрудник лаборатории транспортных систем карьеров и геотехники Института горного дела Уральского отделения Российской академии наук.



UDC 622.684

## BOUNDARY TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF THE APPLICABILITY FOR FRONT LOADERS WORKING AS EXCAVATION AND TRANSPORTATION MACHINES

Artem G. Zhuravlev<sup>1</sup>,  
juravlev@igduran.ru

Vladimir V. Chernykh<sup>1</sup>,  
chernyh@igduran.ru

<sup>1</sup> Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
58, Mamin-Sibiriyak street, Ekaterinburg, 620219, Russia.

**The relevance** of increasing efficiency of mineral deposits mining requires the approach of the most economical mainline transport to the working area of the quarry. At multi-stage development of complex-structured deposits by deep quarries with relatively small sizes in plan (for example, gold, copper, and diamond ore quarries), it may be advisable to combine the functions of excavation and transportation in one machine.

**Objective:** to determine the boundary technical and economic indicators of loaders when used both as excavation machines and transport vehicles. The indicators of the excavator-automobile complex in identical conditions are the boundary ones.

**Objects:** modern high-performance loaders with bucket capacity of 10–40 m<sup>3</sup> when lifting capacity of working equipment is of 20–72 tons and engine power is from 521 to 1715 kW, an excavator-automobile complex based on electromechanical excavators-shovels with bucket capacity of 12 m<sup>3</sup>, and dump trucks BelAZ-7513 with lifting capacity of 136 tons.

**Methods.** The calculations of technical and economic indicators were carried out according to well-known methods described in the scientific and technical literature for cyclic action machines and front loaders. The operating conditions of the equipment are considered in the calculations belong in the range of rational for the excavator-automobile complex, which allows us to compare them with front-end loaders as efficiently as possible.

**Results.** The calculated data on productivity, the cost of mining and transporting work executed by the loaders, depending on the distance of delivery, lifting height, annual productivity by rock mass, taking into account the standard type and size of the loaders (bucket capacity), are summarized. The boundary parameters of the preferred conditions for the use of loaders as excavation and transportation machines in comparison with excavator-automobile complexes are revealed. The paper gives the conclusion about the expediency of continuing research to substantiate the parameters of special excavation and transportation machines.

### Key words:

Assembly quarry transport, front loader, excavation and transportation machine, technical and economic indicators, excavator-automobile complex.

The research was carried out within the framework of the State Task no. 075-00412-22 PR. Methodological foundations of the strategy for integrated development of reserves of solid mineral deposits in the dynamic of development of mining systems (FU WE-2022-0005), reg. no. 1021062010531-8-1.5.1.

### REFERENCES

1. Yakovlev V.L. *Kerogen: issledovanie perekhodnykh protsessov – novoe napravlenie v razvitiy metodologii kompleksnogo osvoeniya georesursov* [Kerogen: the study of transients is a new direction in the development of the methodology of integrated exploration of geo-resources]. Yekaterinburg, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2019. 284 p.
2. Zhuravlev A.G. The issues of optimization parameters of quarry transport systems. *Mining informational and Analytical Bulletin*, 2020, no. 3-1, pp. 583–601. In Rus. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-584-601
3. Zhuravlev A.G., Chendyrev M.A. Computer modeling-based substantiation of effective application conditions for inclined rope hoists in open pit mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.*, 2021, no. 5-2, pp. 309–321. In Rus. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_52\_0\_309.
4. Akishev A.N., Lel Yu.I., Ilbuldin D.Kh., Musikhina O.V., Glebov I.A. Technological solutions for the Alrosa group nyurbinsky open pit depp horizons exposing and processing *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyi zhurnal*, 2017, no. 7, pp. 4–12. In Rus.
5. Trubetskoy K.N. *Kerogen: tekhnologiya primeneniya i parametry karemnykh pogruchchikov* [Kerogen: technology of application and parameters of quarry loaders]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 264 p.
6. Sebeom Park, Yosoon Choi, Han-su Park. Optimization of truck-loader haulage systems in an underground mine using simulation methods. *Geosystem Engineering*, 2016, vol. 19:5, pp. 222–231. DOI: 10.1080/12269328.2016.1176538.
7. Burt C.N., Caccetta L. Match factor for heterogeneous truck and loader fleets, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2007, vol. 21:4, pp. 262–270. DOI: 10.1080/17480930701388606.
8. Hassanean S.H.J., Weizhuo Lu, Olofsson Th. Determining the environmental impact of material hauling with wheel loaders during earthmoving operations. *Journal of the Air & Waste*, 2019, vol. 69, pp. 1195–1214. DOI: 10.1080/10962247.2019.1640805.
9. Cheban A.Yu., Sekisov G.V. Rationale for the use of a combined preparation for selective extraction of ores from complex structure deposits. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 4–12. In Rus. DOI: 10.18503/1995-2732-2020-18-3-4-12
10. Zyryanov I.V., Akishev A.N., Bondarenko I.F. *Kerogen: sovershenstvovanie dobychi i pererabotkialmazosoderzhashchikh rud* [Kerogen: improvement of mining and processing of diamond-bearing ores]. Yakutsk, NEFU Publ. house, 2020. 720 p.
11. Wang F., Wang Z., Wang W., Zhang X. Intelligent maintenance decision system for high speed loader executing agencies based on FT A and FEMCA. *IEEE International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA)*. 2020. pp. 1295–1299. DOI: 10.1109/ICIBA50161.2020.9277429.
12. Wang F., Wen Q., Xu X., Xu B., Sun Z. Site operation strategy for wheel loader/truck loading and transportation cycle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, May 2021, vol. 70, no. 5, pp. 4129–4138. DOI: 10.1109/TVT.2021.3070394.

13. Tebaldi D., Zanasi R. Modeling control and simulation of a power-split hybrid wheel loader 29<sup>th</sup> *Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2021. pp. 465–471. DOI: 10.1109/MED51440.2021.9480213.
14. Wen Q., Wang F., Xu B., Sun Z. Improving the fuel efficiency of compact wheel loader with a series hydraulic hybrid powertrain. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, vol. 69, no. 10, pp. 10700–10709. DOI: 10.1109/TVT.2020.3006155.
15. Kourekhin E.V. Substantiation of technology for development of broken rock utilizing complex surface mining equipment and motor transport for open-pit mines of small capacity. *Mining Information and Analytical Bulletin*, 2015, no. S45-1, pp. 502–518. In Rus.
16. Singh S.P., Narendrula R. Factors affecting the productivity of loaders in surface mines. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2006, vol. 20:1, pp. 20–32. DOI: 10.1080/13895260500261574.
17. Zhuravlev A.G., Chernykh V.V. Technical and economic calculations of the use of loaders as excavation and transportation equipment of open pits. *Problemy nedropolzovaniya*, 2021, no. 1, pp. 45–56. In Rus. DOI: 10.25635/2313-1586.2021.01.045.
18. Furin V.O. *Kerogen: obosnovanie tekhnologicheskikh parametrov uglubochnogo kompleksa dlya dorabotki krutopadayushchikh mestorozhdenii*. Dis. Kand. nauk [Kerogen: justification of technological parameters of the deepening complex for the completion of steep-falling deposits. Cand. Diss.]. Yekaterinburg, 2009. 155 p.
19. Zhuravlev A.G., Skorokhodov A.V. Kerogen: on the issue of substantiating the efficiency of excavator-automobile complexes by computer modeling. *Problemy nedropolzovaniya*, 2015, no. 2, pp. 53–60. In Rus. DOI: 10.18454/23131586.2015.02.053)
20. Glebov A.V. Technological peculiar features in deposit opening of solid minerals while using articulated dump trucks. *Science and Technique*, 2018, vol. 17 (3), pp. 238–245. In Rus. DOI: 10.21122/2227-1031-2018-17-3-238-245

Received: 14 January 2022.

#### Information about the authors

**Artem G. Zhuravlev**, Cand. Sc., head of the Laboratory of Quarry Transport Systems and Geotechnics, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Vladimir V. Chernykh**, junior researcher, Institute of Mining of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.