

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.271
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-1-15-23



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРИЙНО ВЫПУСКАЕМЫХ МОДЕЛЕЙ ВЫЕМОЧНО-ПОГРУЗОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ РАЗНЫХ ТИПОВ

Логонов Е.В., Масальский С.С.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). В современном мире существует необходимость рационализации способов добычи полезных ископаемых при постоянном увеличении эксплуатационных мощностей карьеров. На современных карьерах применяются различные виды горного оборудования для выемочно-погрузочных работ: канатные (тросовые) экскаваторы, гидравлические экскаваторы типа прямая и обратная лопата, фронтальные погрузчики и т.д. Стоит отметить, что одноковшовые экскаваторы на данный момент являются наиболее распространенной выемочно-погрузочной техникой. За счет своих конструктивных особенностей данное оборудование позволяет применять разные технологические схемы разработки месторождений открытым способом. Фронтальные погрузчики, в свою очередь, применяются в основном в качестве вспомогательного оборудования. Однако фронтальные погрузчики могут применяться на добычных работах в тех случаях, когда технологические схемы и конструктивные особенности позволяют достичь максимальной эффективности. В определенных горнотехнических условиях применение фронтальных погрузчиков может оказаться более целесообразным, чем использование других типов горного оборудования. **Новизна.** Описанием применения выемочно-погрузочных машин занимались многие учёные, однако некоторые данные являются устаревшими, тогда как текущее исследование относится к более современной горной технике. **Результат.** Анализ и обобщение данных показали возможность применения фронтальных погрузчиков как основного выемочно-погрузочного оборудования на карьере. В ходе исследования получены зависимости высоты черпания и разгрузки, усилия отрыва от вместимости ковша для одноковшовой выемочно-погрузочной техники. **Практическая значимость.** Полученные в ходе исследования данные могут быть применены как в проектных организациях, так и при корректировании добычных работ непосредственно на месторождении для обоснования выбора выемочно-погрузочной техники, работающей непосредственно в забое.

Ключевые слова: карьерные экскаваторы, фронтальные погрузчики, высота разгрузки, высота черпания, усилие отрыва, выемочно-погрузочные работы, забой, технологическая схема

© Логонов Е.В., Масальский С.С., 2023

Для цитирования

Логонов Е.В., Масальский С.С. Исследование технических характеристик серийно выпускаемых моделей выемочно-погрузочного оборудования разных типов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №1. С. 15-23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-15-23>



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

RESEARCH ON TECHNICAL CHARACTERISTICS OF MASS-PRODUCED MODELS OF EXTRACTION AND LOADING EQUIPMENT OF VARIOUS TYPES

Loginov E.V., Masalskiy S.S.

Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). In today's world there is a need for rationalizing the methods of mining with a constant increase in the production capacity of open pits. In the existing open pits, extraction and loading operations are conducted by using various types of mining equipment: rope shovels, face and backhoe hydraulic shovels, front-end loaders, etc. It should be noted that power shovels are currently the most widespread extraction and loading equipment. Due to its design features, various plans of open pit mining may be used. Front-end loaders, in turn, are mainly used as auxiliary equipment. However, front-end loaders can be used in extraction operations, when process flow charts and design features contribute to achieving maximum efficiency. In some mining conditions, it may be more appropriate to use front-end loaders than other types of mining equipment. **Originality.** The use of extraction and loading equipment has been described by many scientists, but some data are outdated, while the current research is relevant for modern mining machinery. **Results.** Data analysis and integration have shown a potential use of front-end loaders as main extraction and loading equipment in open pits. The studies resulted in establishing dependences between digging height and dump height, bucket breakout force and bucket capacity for shovels and front-end loaders. **Practical Relevance.** The obtained data can be applied both in designing and making corrections to mining operations directly on deposits to provide rationale for choosing extraction and loading equipment operating at a face.

Keywords: mining shovels, front-end loaders, dump height, digging height, breakout force, extraction and loading, face, process flow chart

For citation

Loginov E.V., Masalskiy S.S. Research on Technical Characteristics of Mass-Produced Models of Extraction and Loading Equipment of Various Types. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 1, pp. 15-23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-1-15-23>

Введение

При разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом выемочно-погрузочные работы являются основным технологическим процессом. От качественного ведения данного процесса зависит основной показатель разработки, а именно производительность предприятия по полезному ископаемому, которая, в свою очередь, влияет на экономическую пригодность карьера.

Качество и скорость выемочно-погрузочных работ зависят от техники, технологии и индивидуальны для конкретного месторождения [1-3]. Наиболее распространенным оборудованием, применяемым на карьерах, являются одноковшовые экскаваторы. Многоковшовые экскаваторы в основном применяются на мощных месторождениях пологого и горизонтального залегания. В специальную группу выемочно-погрузочной техники можно выделить фронтальные погрузчики. Данное оборудование в большинстве случаев применяется как вспомогательное. Однако в некоторых случаях фронтальные по-

грузчики могут быть применены в качестве основного оборудования для разработки забоя.

Изучением фронтальных погрузчиков, карьерных одноковшовых экскаваторов и их применением занимались многие ученые: проф. Репин Н.Я., проф. Репин Л.Н., проф. Холодняков Г.А., проф. Хорешок А.А., проф. Фомин С.И., к.т.н. Лигоцкий Д.Н., к.т.н. Журавлёв А.Г., к.т.н. Loginov E.V., к.т.н. Макаров В.Н. и др. [4-6]. Изучением выемочно-погрузочной техники также занимались иностранные учёные [7-9]. В своих трудах исследователи определили область применения данных горных машин, к примеру, Журавлёв А.Г. обосновал, как зависит производительность фронтальных погрузчиков от расстояния транспортирования при их использовании в качестве выемочно-транспортного оборудования [10]. Ученые также занимались обоснованием технологических расчётов для горных машин, определением схем работы выемочного оборудования при различных условиях [11-13]. Лигоцкий Д.Н. описал схемы применения экскаваторов и погрузчиков на строительных карьерах [14, 15].

В учебном пособии «Выемочно-погрузочные работы» проф. Репин Н.Я. и проф. Репин Л.Н. описали область применения фронтальных погрузчиков. При небольших объемах добычных работ фронтальные погрузчики могут применяться в качестве основного выемочно-погрузочного оборудования в комплексе с автосамосвалами. При небольшой дальности перевозки пород они успешно работают как выемочно-транспортирующие машины, заменяя собой экскаваторы и автосамосвалы. Весьма эффективно использование погрузчиков в комплексе с механическими рыхлителями и бульдозерами – когда бульдозеры формируют штабели из разрыхленной породы, а погрузчики осуществляют ее погрузку в транспортные средства. На крупных карьерах погрузчики работают в сочетании с мощными экскаваторами, в частности, при селективной разработке сложных забоев, представленных разносортными рудами, при выемочно-погрузочных работах в стесненных условиях, где затруднена работа экскаваторов, для работы на перегрузочных пунктах, складах и др. При использовании комбинированного транспорта погрузчики успешно справляются с доставкой горной массы от забоев к внутри-карьерным дробильно-перегрузочным пунктам, рудоспускам, к перегрузочным устройствам скиповых подъемников [16].

Описание применения фронтальных погрузчиков можно назвать полным, однако исследования производились в основном до 2010 года [17-19] и некоторые данные являются устаревшими. К примеру, в книге «Выемочно-погрузочные работы» указывается, что наибольший объем ковша для фронтальных погрузчиков равен 21 м^3 , однако на данный момент погрузчик WE2350-2 фирмы Komatsu при комплектации super high lift имеет ковш объемом $53,5 \text{ м}^3$.

Методы исследования

Проведены анализ и изучение литературы, теории и практики применения канатных, гидравлических экскаваторов и фронтальных погрузчиков на карьерах. Также анализ специализированной литературы фирм производителей карьерной техники с целью сбора основных технических характеристик, применение цифровых технологий для аналитического сравнения данных и графического отображения полученных результатов.

Данное исследование посвящено обоснованию параметров системы разработки при использовании выемочно-погрузочной техники, а имен-

но одноковшовых экскаваторов и фронтальных погрузчиков. Одноковшовые экскаваторы, применяемые при выемочно-погрузочных работах, имеют большой спектр применений и делятся по характеру приведения стрелы в действие на следующие виды: тросовые (канатные) механические лопаты, гидравлические экскаваторы с прямой или обратной лопатой [20-22].

Тросовые (канатные) экскаваторы применяются при выемке пород верхним черпанием и разгрузкой ковша как на уровне установки экскаватора (в стандартном исполнении рабочего оборудования), так и на уровне верхней площадки уступа (при удлиненном рабочем оборудовании) [23-25]. Гидравлические экскаваторы типа прямая лопата – верхнее черпание с разгрузкой на уровне экскаватора, а обратные лопаты – как нижнее, так и верхнее черпание с разгрузкой и на уровне стояния, и на нижнюю площадку уступа [26].

Фронтальные погрузчики, в силу строения и конструкции, могут применяться только при верхнем черпании. Разгрузка производится на уровне установки погрузчика, однако для расширения технических характеристик может применяться оборудование super high lift, что позволяет увеличить высоту разгрузки.

Полученные результаты и их обсуждение

Основной идеей данного исследования является сравнение технических характеристик серийно выпускаемого оборудования, которое применяется на выемочно-погрузочных работах. Коллективом авторов предложены следующие обозначения: тросовый (канатный) экскаватор типа прямая механическая лопата – ЭК, гидравлический экскаватор типа прямая лопата – ЭГ, гидравлический экскаватор типа обратная лопата – ЭГО, фронтальный погрузчик – ФП. Были проанализированы основные технические характеристики одноковшовых экскаваторов фирм ТУНИ, НИТАСНИ, Caterpillar, Liebherr, Komatsu, УЗТМ-КАРТЭКС и фронтальных погрузчиков, производимых компаниями «БелАЗ», Caterpillar, НИТАСНИ, Liebherr, Komatsu. Данное оборудование было разделено по вместимости ковша на 7 групп: ~5, ~8, ~11,5, ~23, ~33, ~40, ~50 м^3 , основные результаты представлены в **табл. 1-7**.

Из **табл. 1** видно, что ФП уступают ЭК по всем техническим характеристикам, причём четкой зависимости разницы характеристик от объема ковша не просматривается.

Таблица 1. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша $\sim 5 \text{ м}^3$

Table 1. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of $\sim 5 \text{ m}^3$

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м^3	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Caterpillar	986K (High Lift)	5,1	313	3,54	7,28
ФП	НИТАСИ	ZW550-6	5,4	377	3,80	7,34
ЭГ	Liebherr	R 980 SME	5,1	500	8,00	11,00
ЭГО	Caterpillar	395	5,2	383	9,25	13,54
ЭК	ТУНИ	WK-4D	4,0	–	6,30	10,10
ЭК	УЗТМ-КАРТЭКС	ЭКГ-5А	5,2	500	6,70	10,30

Таблица 2. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша $\sim 8 \text{ м}^3$

Table 2. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of $\sim 8 \text{ m}^3$

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м^3	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Caterpillar	988K (High Lift)	8,0	381	4,04	8,22
ФП	Liebherr	L 586 XPower (High Lift)	8,5	240	5,10	7,70
ЭГ	Liebherr	R 9150 G7	8,3	720	8,80	13,20
ЭГО	Caterpillar	6015	8,1	538	–	12,80
ЭК	УЗТМ-КАРТЭКС	ЭКГ-8И	8,0	–	8,6	13,2

Таблица 3. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша $\sim 11,5 \text{ м}^3$

Table 3. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of $\sim 11.5 \text{ m}^3$

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м^3	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Белаз	78250	11,5	–	3,80	7,34
ФП	Komatsu	WA800-8	11,5	690	4,61	9,50
ЭГ	НИТАСИ	EX1200-7	12,0	709	10,35	14,67
ЭГО	Caterpillar	6020B	12,0	730	–	13,90
ЭК	ТУНИ	WK-12C	12,0	–	8,60	13,53
ЭК	УЗТМ-КАРТЭКС	ЭКГ-12К	12,0	–	8,3	14,0

Таблица 4. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша $\sim 23 \text{ м}^3$

Table 4. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of $\sim 23 \text{ m}^3$

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м^3	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Komatsu	WE1350-3	22,9	978	6,42	11,40
ФП	Caterpillar	994K	24,5	1 206	6,10	11,77
ЭГ	НИТАСИ	EX3600-7	22,0	1 030	10,99	16,75
ЭГО	Liebherr	R 9400 G6	24,0	1 000	10,60	15,70
ЭК	Komatsu	2300XPC AC	25,0	–	8,50	13,50
ЭК	УЗТМ-КАРТЭКС	ЭКГ-20КМ	25	–	10,0	16,8

Таблица 5. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша ~33 м³

Table 5. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of ~33 m³

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м ³	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Komatsu	WE1850-3	32,9	1 075	6,48	12,57
ЭГ	Caterpillar	6060 AC FS	34,0	1 730	11,60	15,50
ЭГО	НІТАСНІ	EX5600-6	34,0	1 480	12,20	19,70
ЭК	УЗТМ-КАРТЭКС	ЭКГ-32Р	35,0	–	11,8	18,3

Таблица 6. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша ~40 м³

Table 6. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of ~40 m³

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м ³	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Komatsu	WE2350-2	40,5	1 173	7,03	13,39
ЭГ	Liebherr	R 9800 G6	42,0	2 395	12,40	19,90
ЭГО	НІТАСНІ	EX8000-6	43,0	2 020	11,90	19,00
ЭК	Caterpillar	7295	39,0	–	8,40	13,70
ЭК	УЗТМ-КАРТЭКС	ЭКГ-35	35,0	–	12,3	19,30

Таблица 7. Модельный ряд фронтальных погрузчиков, одноковшовых карьерных экскаваторов и их технические характеристики при вместимости ковша ~50 м³

Table 7. Model range of front-end loaders, power shovels and their performance at a bucket capacity of ~50 m³

Вид	Фирма	Модель	Вместимость ковша, м ³	Усилие отрыва, кН	Высота разгрузки, м	Высота черпания, м
ФП	Komatsu	WE2350-2 (Super High Lift)	53,5	980	9,53	15,85
ЭК	ТУНІ	WK-55	55,0	–	10,06	18,10
ЭК	Komatsu	4100C BOSS	49,0	–	9,50	16,90
ЭК	Caterpillar	7395	55,8	–	9,40	14,90
ЭК	Caterpillar	7495	62,7	–	10,06	16,30

Исходя из собранных данных, фирма производитель Komatsu является единственной компанией на данный момент, производящей фронтальные погрузчики с вместимостью ковша более 25 м³.

При проектировании карьеров необходимо обосновывать высоту уступов. В основном высота уступа задается проектом на стадии проектирования и остается постоянной на весь срок отработки или корректируется на определенном этапе разработки [27]. Высота уступа влияет на скорость углубки карьера и тип применяемой техники. Основной характеристикой выемочной техники, зависящей от высоты уступа, является высота черпания. В ходе исследования были проанализированы основные серийно выпускае-

мые модели ФП, ЭК, ЭГ, и ЭГО. Так как проанализированные технические характеристики гидравлических экскаваторов типа прямая и обратная лопата схожи, поэтому ЭГ и ЭГО были выделены в одну группу. В ходе исследования была получена нелинейная зависимость высоты черпания от вместимости ковша (рис. 1).

На рис. 1 можно наглядно увидеть, как статистически выглядит разница между высотой черпания у фронтальных погрузчиков и карьерных экскаваторов. Проанализировав рис. 1, приходим к выводу, что фронтальные погрузчики имеют меньшую высоту черпания, но для некоторых типоразмеров разница незначительная, (например, в классе более 50 м³ данное значение

для ФП практически одинаковое с ЭК). В итоге можно сделать вывод, что при рассмотрении только высоты черпания, как основного фактора между двумя видами техники, фронтальные погрузчики фирмы Komatsu с объемом ковша более 20 м³ могут соперничать с некоторыми ЭК – при потере высоты черпания в диапазоне (2,5-18,5)%. Что интересно, в классе объема ковша свыше 50 м³ фронтальный погрузчик WE2350-2 (с оборудованием super high lift) имеет большую на 0,95 м высоту черпания, то есть на 6,4%, чем у канатного экскаватора фирмы Caterpillar, при возможности номинального уравнивания вместимостей их ковшей.

В среднем же высота черпания ФП отличается на 32,2% от ЭК и на 54,5% от ЭГ и ЭГО.

Высота разгрузки выемочно-погрузочного оборудования также является важной характеристикой при эффективной работе карьера. Данная характеристика необходима для эффективной работы звена экскаватор/погрузчик – автосамосвал, основанной на возможности загрузки транспортных средств (учитываются габаритные размеры автотранспорта). Если высота разгрузки недостаточная, то использование автосамосвалов большой грузоподъемности будет невозможно. На основании сопоставления информации была получена зависимость высоты разгрузки от вместимости ковша (рис. 2).

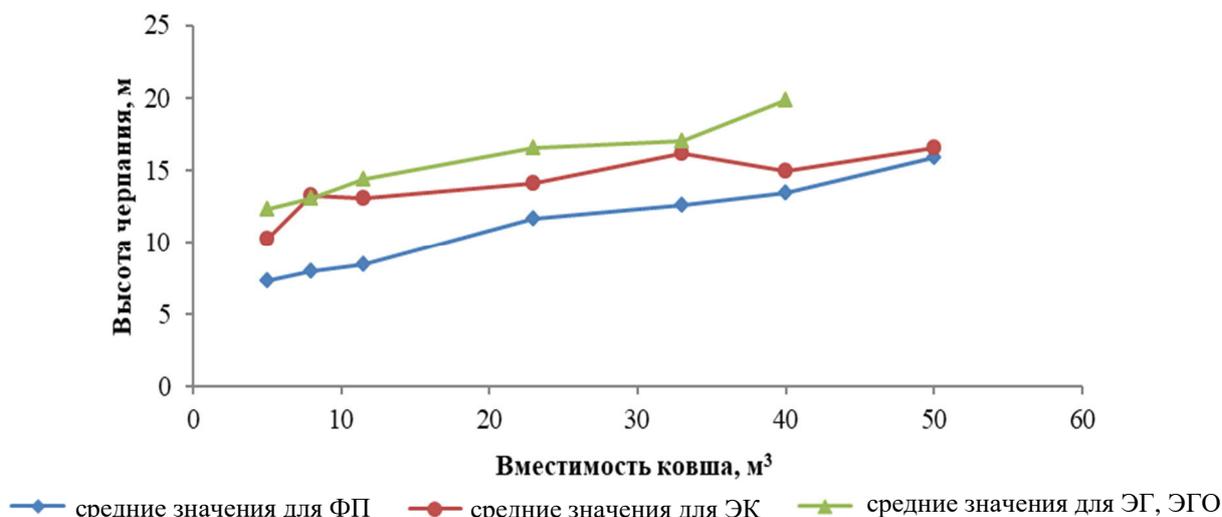


Рис. 1. Зависимость средних значений высоты черпания ФП, ЭК, ЭГ и ЭГО от вместимости их ковша
 Fig. 1. Dependence between average values of digging height of the front-end loader, the open pit excavator, the caterpillar shovel and the backhoe shovel and their bucket capacity

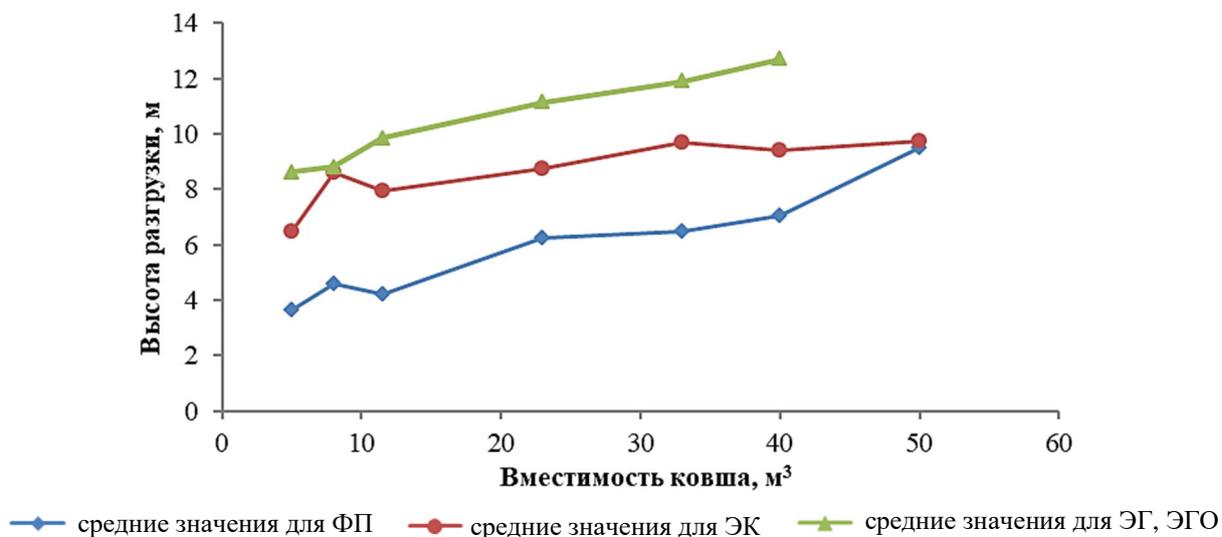


Рис. 2. Зависимость средних значений высоты разгрузки ФП, ЭК, ЭГ и ЭГО от вместимости их ковша
 Fig. 2. Dependence between average values of breakout force of the front-end loader, the open pit excavator, the caterpillar shovel and the backhoe shovel and their bucket capacity

Фронтальные погрузчики со стандартным оборудованием объективно уступают в высоте разгрузки экскаваторам в силу конструктивных особенностей. В среднем эта разница равна 4,26 м – 70,4% (см. **рис. 2**). Однако эту разницу можно уменьшить благодаря оборудованию «high lift», «super high lift». Использование оборудования «high lift» присуще как ФП, так и карьерным экскаваторам. Данное оборудование позволяет увеличить высотные характеристики техники. При вместимости ковша более 50 м³ оборудование «super high lift» позволяет обеспечить равные параметры высоты разгрузки фронтального погрузчика и карьерного экскаватора, а в некоторых случаях даже превзойти ее.

Также стоит отметить, что высота разгрузки для гидравлических экскаваторов и для ЭК в среднем отличается на 24,0%, что на 10% больше, чем при их сравнении по высоте черпания. Высота черпания ФП, в свою очередь, меньше, чем ЭГ, ЭГО, на 100,7% и на 54,3%, чем ЭК.

Заключительной характеристикой выемочно-погрузочной техники, рассматриваемой в данном исследовании, является усилие отрыва. От значений усилия отрыва зависят способы механизации основных технологических процессов: некоторые породы могут разрабатываться выемочно-погрузочной техникой самостоятельно (без предварительного рыхления) или насколько хорошо должен быть подготовлен массив (использование предварительной подготовки).

На основе анализа серийно выпускаемых моделей гидравлических экскаваторов, как прямой лопаты (ЭГ), так и обратной (ЭГО), и фронтальных погрузчиков (ФП) была получена зависимость средних значений усилия отрыва от вместимости их ковша (**рис. 3**).

Исходя из **рис. 3**, разница между средними значениями усилия отрыва между исследуемой техникой при вместимости ковша ~11,5 и ~23 м³ близка к нулю. Однако она начинает резко расти с увеличением объема ковша и к ~40 м³ значения в среднем отличаются на 1042 кН, что на 88,8% больше, чем усилие копания ФП при данной вместимости ковша.

Из этих данных следует, что целесообразность применения фронтальных погрузчиков с вместимостью ковша более 20 м³ при выемочно-погрузочных работах на месторождениях с крепкими породами находится под вопросом, так как затраты на буровзрывные работы увеличатся, тем не менее меньшая в несколько раз стоимость погрузчиков относительно экскаваторов может окупить эти вложения.

Важным фактором применения горнодобывающей техники является срок службы. Срок эксплуатации карьерного экскаватора определяется по нормативной, конструкторской и эксплуатационной документации на карьерный экскаватор, а также по стандартам и правилам безопасности. Срок эксплуатации для карьерных тросовых экскаваторов составляет 15-20 лет, в то время как эксплуатационный срок использования гидравлических экскаваторов не превышает 10-12 лет. Средний срок службы фронтального погрузчика на горном предприятии около 7-8 лет.

Полностью заменить один вид техники другим невозможно, поэтому изучение технических характеристик и применение выемочно-погрузочного оборудования разных типов позволит повысить эффективность открытой разработки.

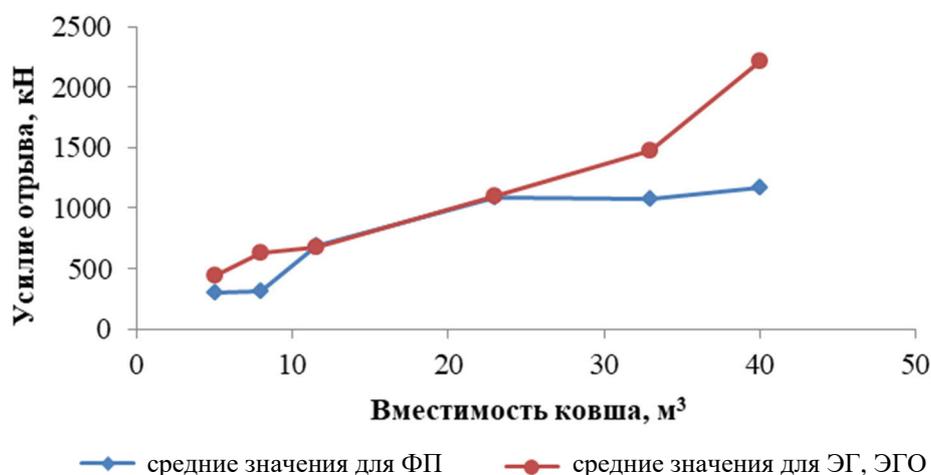


Рис. 3. Зависимость средних значений усилия отрыва ФП и экскаваторов ЭГ, ЭГО от вместимости их ковша
Fig. 3. Dependence between average values of dump height of the front-end loader and the open pit excavator, the backhoe shovel and their bucket capacity

Заключение

1. Срок службы канатных экскаваторов почти в 2 раза больше, чем у ЭГ и ФП.
2. Гидравлические экскаваторы лидируют по усилию отрыва.
3. Канатные и гидравлические экскаваторы занимают лидирующие позиции по высоте черпания, высоте разгрузке.
4. Фронтальные погрузчики с вместимостью ковша от ~23 до ~50 м³ могут конкурировать по техническим характеристикам ЭК со сходными ковшами.
5. При типоразмере более 50 м³ разница между ФП ЭК минимальна, это обусловлено применением конфигурации оборудования Super High Lift.

Список источников

1. Холодныков Г.А., Логинов Е.В., Ву Дык Туан. Малоотходная открытая разработка полезных ископаемых с помощью гидравлических экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. №1. С. 357-363.
2. Оценка показателей работоспособности карьерных экскаваторов в реальных условиях эксплуатации / А.А. Емельянов, Д.А. Шибанов, Е.В. Пумпур, С.Л. Иванов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. №10. С. 86-94.
3. Копанская А.А., Трейман М.Г. Анализ технико-экономических показателей транспортных систем горнообогатительных комплексов // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент». 2020. №4. С. 17-28.
4. Оценка степени взаимовлияния вместимости ковша экскаватора и кузова автосамосвала / А.А. Хорешок, Д.М. Дубинкин, М.А. Тюленев, С.О. Марков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2021. №3. С. 104-112.
5. Fomin S.I., Ivanov V.V. Improving the reliability of opencast system for complex structure ore deposits // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018, vol. 9, no. 13, pp. 36-43.
6. Холодныков Г.А., Аргимбаев К.Р., Решетняк С.П. Определение высоты добычного забоя при разработке хвостохранилищ гидравлическим экскаватором типа обратная лопата // Записки Горного института. 2012. Т. 195. С. 138-141.
7. Jung T., Raduenz H., Krus P., J. De Negri V., Lee J. Boom energy recuperation system and control strategy for hydraulic hybrid excavators. Automation in Construction. 2022, vol. 135, pp. 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104046>
8. Yuasa T., Ishikawa M. An Optimal design methodology for the trajectory of hydraulic excavators based on genetic algorithm // Journal of robotics and mechatronics. 2021, vol. 33, pp. 1248-1254. DOI: 10.20965/jrm.2021.p1248.

9. Li Y., Mu X., Fan R. Multi-objective optimization and simulation of novel working mechanism for face-shovel excavator // International Journal of Intelligent Robotics and Applications. 2021, vol. 5, no. 1, pp. 1-9. DOI: 10.1007/s41315-020-00160-1
10. Журавлёв А.Г., Черных В.В. Техничко-экономические расчёты применения погрузчиков в качестве выемочно-транспортного оборудования карьеров // Проблемы недропользования. 2021. №1. С. 45-55.
11. Иванов В.В., Дзюрич Д.О. Обоснование параметров технологической схемы разработки обводненных месторождений строительного песка // Записки Горного института. 2022. URL: <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.3>
12. Loginov E.V., Tyuleneva T.A. Control of quarry parameters to improve the efficiency of hydraulic backhoes // Ugol. 2021, vol. 12, pp. 6-10. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-12-6-10
13. Fomin S.I., Ivanov V.V., Semenov A.S., Ovsyannikov M.P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020, vol. 11, no. 15, pp. 1306-1311.
14. Лигоцкий Д.Н., Фомин С.И. Технология разработки месторождений строительных материалов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПГТУ, 2011. 91 с.
15. Аргимбаев К.Р., Лигоцкий Д.Н. Открытая разработка месторождений строительных материалов: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2022. 104 с.
16. Репин Н.Я., Репин Л.Н. Выемочно-погрузочные работы: учеб. пособие. М.: Горная книга, 2012. 272 с.
17. Арсентьев А.И. Разработка месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом. СПб.: Изд-во СПГТУ, 2010. 115 с.
18. Анистратов Ю.И. Технология открытых горных работ. М.: ООО «НТЦ «Горное дело», 2008. 472 с.
19. Открытые горные работы: справочник / К.Н. Трубецкой, М.Г. Потапов, К.Е. Виницкий, Н.Н. Мельников и др. М.: Горное бюро, 1994. 590 с.
20. Drebenstedt C., Argimbaev K.R. Korkinsk brown coal open pit as a case study of endogenous fires // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 2021, vol. 34, no. 1, pp. 292-304.

References

1. Kholodnyakov G.A., Loginov E.V., Vu Duc Tuan. Low-waste open-pit mining using hydraulic excavators. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2017;(1):357-363. (In Russ.)
2. Emelyanov A.A., Shibanov D.A., Pumpur E.V., Ivanov S.L. Evaluation of working efficiency of open pit shovels in real operating conditions. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2020;(10):86-94. (In Russ.)

3. Kопanskaya A.A., Treyman M.G. Analysis of technical and economic indicators of transport systems of mining and processing complexes. *Nauchny zhurnal NIU ITMO. Seriya Ekonomika i ekologicheskii menedzhment* [Scientific journal of NRU ITMO. Series: Economics and Environmental Management]. 2020;(4):17-28. (In Russ.)
4. Khoreshok A.A., Dubinkin D.M., Tyulenev M.A., Markov S.O. Estimation of the degree of mutual influence of the excavator bucket capacity and haul truck body. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Kuzbass State Technical University]. 2021;(3):104-112. (In Russ.)
5. Fomin S.I., Ivanov V.V. Improving the reliability of opencast system for complex structure ore deposits. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018;9(13):36-43.
6. Kholodnyakov G.A., Argimbaev K.R., Reshetnyak S.P. Determining the mine working height for the development of tailing dumps with a hydraulic backhoe excavator. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of the Mining Institute]. 2012;195:138-141. (In Russ.)
7. Jung T., Raduenz H., Krus P., J. De Negri V., Lee J. Boom energy recuperation system and control strategy for hydraulic hybrid excavators. *Automation in Construction*. 2022;135:1-20. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104046>
8. Yuasa T., Ishikawa M. An optimal design methodology for the trajectory of hydraulic excavators based on genetic algorithm. *Journal of Robotics and Mechatronics*. 2021;33:1248-1254. DOI: 10.20965/jrm.2021.p1248
9. Li Y., Mu X., Fan R. Multi-objective optimization and simulation of novel working mechanism for face-shovel excavator. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*. 2021;5(1):1-9. DOI: 10.1007/s41315-020-00160-1
10. 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* [Problems of Subsurface Use]. 2021;(1):45-55. (In Russ.)
11. Ivanov V.V., Dzyurich D.O. Justification of the technological scheme parameters for the development of flooded deposits of construction sand. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of the Mining Institute]. 2022. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.3> (In Russ.)
12. Loginov E.V., Tyuleneva T.A. Control of quarry parameters to improve the efficiency of hydraulic backhoes. *Ugol* [Coal]. 2022;(12):6-10. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-12-6-10
13. Fomin S.I., Ivanov V.V., Semenov A.S., Ovsyannikov M.P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020;11(15):1306-1311.
14. Ligotskiy D.N., Fomin S.I. *Tekhnologiya razrabotki mestorozhdenii stroitelnykh materialov: ucheb. posobie* [Technology of development of deposits of building materials: study guide]. Saint Petersburg: Saint Petersburg Mining University; 2011. 91 p. (In Russ.)
15. Argimbaev K.R., Ligotskiy D.N. *Otkrytaya razrabotka mestorozhdenii stroitelnykh materialov: ucheb. posobie* [Open development of deposits of building materials: study guide]. Saint Petersburg: Lan; 2022. 104 p. (In Russ.)
16. Repin N.Ya., Repin L.N. *Vyemochno-pogruzochnye raboty: ucheb. posobie* [Extraction and loading operations: study guide]. Moscow: Gornaya kniga; 2012. 272 p. (In Russ.)
17. Arsentev A.I. *Razrabotka mestorozhdenii tverdykh poleznykh iskopaemykh otkrytym sposobom* [Open-pit mining of solid mineral deposits]. Saint Petersburg: Saint Petersburg Mining University; 2010. 115 p. (In Russ.)
18. Anistratov Yu.I. *Tekhnologiya otkrytykh gornykh rabot* [Open-pit mining technology]. Moscow: LLC Mining Research and Technical Center; 2008. 472 p. (In Russ.)
19. Trubetskoy K.N., Potapov M.G., Vinitskii K.E., Melnikov N.N. et al. *Otkrytye gornye raboty: spravochnik* [Open-pit mining: Guide]. Moscow: Gornoe byuro; 1994. 590 p. (In Russ.)
20. Drebenstedt C., Argimbaev K.R. Korkinsk brown coal open pit as a case study of endogenous fires. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*. 2021;34(1):292-304.

Поступила 09.11.2022; принята к публикации 16.12.2022; опубликована 27.03.2023
Submitted 09/11/2022; revised 16/12/2022; published 27/03/2023

Логинов Егор Вячеславович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия. Email: loginov_ev@pers.spmi.ru. ORCID 0000-0003-3965-0839

Масальский Сергей Сергеевич – студент кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия. Email: 433ckacl750@gmail.com.

Egor V. Loginov – PhD (Eng.), Senior Lecturer, the Department of Development of Mineral Deposits, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: loginov_ev@pers.spmi.ru. ORCID 0000-0003-3965-0839

Sergey S. Masalskiy – student the Department of Development of Mineral Deposits, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia.
Email: 433ckacl750@gmail.com.