

Анализ методик расчета производительности карьерных гидравлических экскаваторов

О.И. Литвин¹, А.А. Хорешок¹, Д.М. Дубинкин¹, С.О. Марков², Д.В. Стенин¹, М.А. Тюленев¹ ✉

¹ Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

² Филиал Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева в г. Междуреченске, г. Междуреченск, Российская Федерация

✉ tma.geolog@kuzstu.ru

Резюме: Производительность механических и гидравлических экскаваторов – основной показатель, характеризующий эффективность их работы, и инструмент для планирования всех видов работ, в которых задействованы выемочно-погрузочные машины. Существующее значительное количество методик расчета производительности выемочных машин при общей их схожести и подчиненности одному направлению имеет достаточно много различий, препятствующих использованию той или иной методики в качестве унифицированной или создания таковой на её основе. В основном эти различия касаются поправочных коэффициентов, характеризующих режимы работы экскаваторов. При вычислении технической и тем более паспортной производительности методики их расчета более или менее совпадают и можно сделать определенные обобщения о генезисе того или иного коэффициента; другое дело, производительность эксплуатационная. В данной работе авторы анализируют методики расчета производительности экскаваторов согласно руководствам некоторых зарубежных фирм-производителей, а также справочникам по горному делу. Установлены некоторые различия как в самих методиках, так и в горной терминологии; предложены первоочередные мероприятия для ликвидации выявленных недостатков.

Ключевые слова: гидравлический экскаватор, открытые горные работы, техническая производительность, эксплуатационная производительность, карьерный автотранспорт, забойный блок

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 г. №075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева» Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс») в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ

Для цитирования: Литвин О.И., Хорешок А.А., Дубинкин Д.М., Марков С.О., Стенин Д.В., Тюленев М.А. Анализ методик расчета производительности карьерных гидравлических экскаваторов. *Горная промышленность*. 2022;(5):112–120. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-112-120>

Analysis of methods for calculating the productivity of open-pit hydraulic shovels and backhoes

O.I. Litvin¹, A.A. Khoreshok¹, D.M. Dubinkin¹, S.O. Markov², D.V. Stenin¹, M.A. Tyulenev¹ ✉

¹ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

² Mezhdurechensk Branch of the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Mezhdurechensk, Russian Federation

✉ tma.geolog@kuzstu.ru

Abstract: The productivity of mechanical and hydraulic excavators is the main indicator characterizing the efficiency of their operation and a tool for planning all kinds of works, in which excavators are involved. There is a considerable quantity of techniques to calculate the productivity of mining machines; despite their general similarity and subordination to the same trend, there are many discrepancies which prevent the use of one or another technique as a universal one or creation of such on its basis. Basically, these discrepancies concern the correction coefficients, characterizing the excavator operating modes. When calculating the technical, and even more, the passport capacity, the methods of their calculation are more or less the same, and certain generalizations can be made about the genesis of a particular factor, but the operational performance is a completely different matter. In this paper, the authors analyze the methods of calculating the capacity of excavators according to the manuals of some foreign manufacturers, as well as reference books on mining. Some discrepancies both in the methods themselves and in the mining terminology are established; priority measures for the elimination of the identified shortcomings are proposed. The current situation in the field of software shows the other side of globalization, which, in fact, has led to monopolization of the Russian market by the Western software companies. The solution to this problem is the transition to domestic software. And this

is not only the task of the state, but also that of enterprises interested in the stable functioning of their industries and the growth of qualifications of their employees, because domestic developers rely primarily on the knowledge and experience of Russian specialists, involving them in the innovation process.

Keywords: hydraulic excavator, open-pit mining, technical capacity, operating capacity, open-pit dump trucks, face block

Acknowledgments: This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under Agreement №075-15-2022-1198 dated 30.09.2022 with the Gorbachev Kuzbass State Technical University on complex scientific and technical program of full innovation cycle: "Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life" (the "Clean Coal - Green Kuzbass" Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle) as part of implementing the project "Development and creation of an unmanned shuttle-type mine truck with a payload of 220 tonnes" in terms of research, development and experimental-design work.

For citation: Litvin O.I., Khoreshok A.A., Dubinkin D.M., Markov S.O., Stenin D.V., Tyulenev M.A. Analysis of methods for calculating the productivity of open-pit hydraulic shovels and backhoes. *Russian Mining Industry*. 2022;(5):112–120. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-5-112-120>

Введение

На открытых горных работах за последние 10–15 лет широкое распространение получили гидравлические экскаваторы. Их применяют в самых разнообразных условиях: при отработке породугольных панелей, работе в угленасыщенных зонах, выемке маломощных и сложноструктурных пластов и т.д. [1–7]. Экскаваторы такого типа доказали свою востребованность вследствие того, что они в отличие от мехлопат или драглайнов [8; 9] быстро адаптируются к изменчивости горно-геологических условий, что особо актуально для имеющих сложное строение месторождений Кузбасса. Как правило, каждое горное предприятие или проектный институт при моделировании [10; 11] или расчете производительности использует поправочные коэффициенты, полученные чаще всего опытным путем. Опять же, чаще всего такие коэффициенты валидны только для определенного, зачастую достаточно узкого, диапазона горно-геологических и горнотехнических условий. Необходимо также учитывать и условия погрузки [12; 13]. С точки зрения внедрения государственных стандартов и нормативных документов ситуация ничуть не лучше, поскольку, например, если говорить о единых нормах выработки на открытые горные работы, то последний регламентирующий документ был принят в 1988 г.¹ и изменений с тех пор не претерпел (самая мощная модель карьерной мехлопаты – ЭКГ-12,5); однако этот документ отменен согласно

Постановлению Правительства Российской Федерации от 13 июня 2020 г. №857, а новых Норм до настоящего времени не разработано. С другой стороны, зарубежные фирмы-производители также не выработали единого мнения по расчету производительности экскаваторов, остановившись на весьма общих формулах и методиках.

Расчет производительности экскаваторов

Например, согласно мануалу фирмы-производителя Hitachi² часовая производительность рассчитывается как

$$Q_u = \frac{3600 \cdot E \cdot K_k \cdot \mathcal{E}}{T_{цикл} \cdot K_{\gamma}}$$

где E – вместимость ковша экскаватора «с шапкой», м³; K_k – коэффициент наполнения ковша (в оригинале – «коэффициент ковша» («bucket factor»)), определяется по таблице; \mathcal{E} – эффективность работы (по сути, коэффициент использования рабочего времени), в оригинале – «work efficiency»; $T_{цикл}$ – паспортное время цикла (в оригинале – «базовое время цикла» («basic cycle time»)), с; K_{γ} – коэффициент, зависящий от угла поворота экскаватора и его глубины копания; определяется по таблице производителя.

Как отмечает производитель, «коэффициент ковша» зависит от типа грунта и глубины копания (табл. 1).

По другой методике коэффициент наполнения ковша принимается по следующей таблице (табл. 2).

Таблица 1
Значения «коэффициента ковша» в зависимости от типа экскавации

Экскавация	Легкая	Средняя	Относительно тяжелая	Тяжелая
K_k	0,8–1,0	0,7–0,9	0,6–0,8	0,4–0,7
Материал	Рыхлый песок; легко насыпаемая уплотненная почва с небольшим количеством пустот в ковше; глина с высоким содержанием песка	Легко обрушающийся грунт (не требуется взрывных работ); песок и грунт, загруженные в ковш с воздушными пустотами; влажная или сухая глина; крупный гравий; уплотнённый песок и грунт	Мелко раздробленный известняк и песчаник; влажная связная глина; гравий, содержащий щебень; выемка из-под воды	Крупнокусковые взорванные породы, загруженные в ковш с большим коэффициентом разрыхления

Table 1
Bucket factor dependence on the type of excavation

¹ Единые нормы выработки на открытые горные работы для предприятий горнодобывающей промышленности. Часть III. Экскавация и транспортирование горной массы автосамосвалами. М.: Типогр. при НИИТруда; 1988. 82 с.

² Hitachi. The excavators data book. 2nd ed. Hitachi Corp.

ГОРНЫЕ МАШИНЫ

Mining machines

Таблица 2
Значения коэффициента
наполнения ковша

Материал	Коэффициент наполнения ковша K_k
Обычный грунт, супесь	0,80–1,10
Песок и гравий	0,90–1,00
Тяжелая глина	0,65–0,95
Влажная глина	0,50–0,90
Хорошо взорванные породы	0,70–0,90
Плохо взорванные породы	0,40–0,70

Эффективность работы \mathcal{E} также принимается по табличным значениям (табл. 3).

Таблица 3
Зависимость эффективности
работы от ее условий

Условия работы	Эффективность работы \mathcal{E}
Весьма благоприятные	0,9 (55 мин/ч)
Благоприятные	0,83 (50 мин/ч)
Обычные	0,75 (45 мин/ч)

Базовое время цикла $t_{цик}$, с (табл. 4).

Таблица 4
Значения базового времени
цикла для некоторых моделей
гидролопат

Модель экскаватора	Базовое время цикла, с	Режим
EX1200	22	максимальной производительности
EX1900	25	
EX2500	27	
EX3600	28	
EX5500	30	

Коэффициент $K_{гв}$ (табл. 5).

Таблица 5
Значения коэффициента,
зависящего от угла поворота и
глубины копания экскаватора

Глубина черпания	Угол поворота			
	45°	90°	135°	180°
Менее 40% максимальной глубины черпания	0,80	0,85	0,95	1,05
40–75% максимальной глубины черпания	0,95	1,00	1,10	1,20
Более 75% максимальной глубины черпания	1,10	1,15	1,25	1,40

В соответствии с вышеприведенными таблицами Hitachi выдает и готовые таблицы с рассчитанной производительностью для, очевидно, всего круга условий; однако они

Table 2
Bucket fill ratio values

Material	Bucket fill ratio K_k
Ordinary soil, silt	0,80–1,10
Sand and gravel	0,90–1,00
Heavy clay	0,65–0,95
Moist clay	0,50–0,90
Well broken rocks	0,70–0,90
Poorly broken rocks	0,40–0,70

Table 3
Dependence of work
efficiency on its conditions

Work conditions	Work efficiency \mathcal{E}
Very favorable	0,9 (55 min/h)
Favorable	0,83 (50 min/h)
Normal	0,75 (45 min/h)

Table 4
Base cycle time values for
some hydraulic excavators'
models

Excavator model	Base cycle time, s	Mode
EX1200	22	maximum productivity
EX1900	25	
EX2500	27	
EX3600	28	
EX5500	30	

Table 5
Values of the factor
depending on the rotation
angle of the excavator and its
digging depth

Digging depth	Rotation angle			
	45°	90°	135°	180°
Less than 40% of maximum digging depth	0,80	0,85	0,95	1,05
40–75% of maximum digging depth	0,95	1,00	1,10	1,20
More than 75% of maximum digging depth	1,10	1,15	1,25	1,40

дают эти результаты только для определенных коэффициентов, в частности: $K_k = 0,9$; $\mathcal{E} = 0,9$; $K_{гв} = 1,0$ (табл. 6).

Таблица 6
Часовая производительность,
м³/ч

Экскаватор	Вместимость ковша («с шапкой»), м ³	Эффективность работы			
		1,00	0,83	0,75	0,50
EX1200	5,2	766	636	574	383
EX1900	12	1555	1291	1166	778
EX2500	15	1800	1494	1350	900
EX3600	22	2546	2113	1909	1273
EX5500	29	3132	2600	2349	1566

Table 6
Hourly productivity, м³/h

Для наших расчетов можно допустить положение о том, что эффективность (коэффициент использования рабочего времени) не будет превышать 0,75.

Коэффициент $K_{гв}$ вообще, судя по табл. 5, предполагает брать за единицу производительность экскаватора при глубине черпания, равной примерно половине (0,4–0,75) максимальной глубины черпания, и угле поворота 90 град. Назовем его «Коэффициент, учитывающий угол поворота и глубину» и условно приравняем его к нашему $K_{гв}$ – коэффициенту влияния технологии выемки.

Эффективность работы (коэффициент использования), равная единице, соответствует непрерывной работе экскаватора. Это в принципе недостижимо – даже, например, при перевалке навалов – экскаватор в любом случае не будет стоять на одном и том же месте целый час или более. Поэтому можно сделать вывод о том, что показатель эффективности работы, равный единице, соответствует паспортной производительности экскаватора.

Зарубежные справочники дают [14] несколько иные значения коэффициента глубины-поворота и производительности в целом:

$$Q_{гв} = C_{гв} \cdot K_{гв} \cdot E \cdot K_{гв} \cdot \mathcal{E},$$

где $C_{гв}$ – количество циклов в час (табл. 7 и 9 соответственно для обратной и прямой гидролопаты); $K_{гв}$ – коэффициент поворота-черпания (табл. 8 и 10 соответственно); E – вместимость ковша «с шапкой», м³; $K_{гв}$ – коэффициент наполнения ковша (табл. 11); \mathcal{E} – эффективность работы (коэффициент технологии выемки) (табл. 3).

Таблица 7
Количество циклов в час для
обратной лопаты

Класс породы	Типоразмер экскаватора		
	малый ($E < 0,76 \text{ м}^3$)	средний ($E = 0,94\text{--}1,72 \text{ м}^3$)	большой ($E > 1,72 \text{ м}^3$)
Мягкий (песок, гравий, суглинок, супесь)	250	200	150
Средний (рядовой грунт, глина)	200	160	120
Тяжелый (прочные глины, скальные и полускальные породы)	160	130	100

Table 7
Number of cycles per hour for
the backhoe

Таблица 8
Поправочные коэффициенты поворота-черпания для обратной гидролопаты

Глубина черпания, % от максимальной	Угол поворота					
	45°	60°	75°	90°	120°	180°
30	1,33	1,26	1,21	1,15	1,08	0,95
50	1,28	1,21	1,16	1,10	1,03	0,91
70	1,16	1,10	1,05	1,00	0,94	0,83
90	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,75

Отмечаем, что для прямой и обратной гидролопаты устанавливается разное количество циклов в час. Также, на наш взгляд, несколько странным выглядит установление одинакового количества циклов для экскаваторов, вместимость ковша которых начинается уже с 1,72 м³, а верхний предел не ограничен.

Таблица 9
Количество циклов в час для прямой гидролопаты

Table 8
Correction coefficients for rotation and digging of the backhoe

Table 9
Number of cycles per hour for a hydraulic shovel

«плохо взорванные породы» (табл. 11). Коэффициент крепости, абразивность, взрываемость и иные свойства пород вообще не принимаются в расчет. Также отсутствуют какие-либо поправочные коэффициенты, касающиеся среднего размера куска взорванной горной массы.

Согласно [15] часовая производительность определяется как

$$Q_{ч} = U_{ч} \cdot E_{ср},$$

где $U_{ч}$ – число циклов в час; $E_{ср}$ – средняя нагрузка в ковше:

$$E_{ср} = E^{ш} \cdot K_{н.к},$$

где $E^{ш}$ – объем ковша экскаватора «с шапкой», м³; $K_{н.к}$ – коэффициент наполнения ковша.

Средняя нагрузка в ковше экскаватора, хоть и имеет расчетную формулу, принимается с учетом данных табл. 12.

Эксплуатационная производительность рассчитывается как

$$Q_{экспл} = Q_{ч} \cdot \Delta_{эф},$$

где $\Delta_{эф}$ – коэффициент использования рабочего времени (в среднем, согласно этому же справочнику он равен 0,83).

Класс породы	Типоразмер экскаватора					
	малый ($E < 3,8 \text{ м}^3$)		средний ($E = 3,8-7,6 \text{ м}^3$)		большой ($E > 7,6 \text{ м}^3$)	
	Донная разгрузка	Фронтальная разгрузка	Донная разгрузка	Фронтальная разгрузка	Донная разгрузка	Фронтальная разгрузка
Мягкий (песок, гравий, уголь)	190	170	180	160	150	135
Средний (рядовой грунт, мягкая глина, хорошо взорванная порода)	170	150	160	145	145	130
Тяжелый (крепкие глины, плохо взорванные породы)	150	135	140	130	135	125

Таблица 10
Поправочные коэффициенты поворота-черпания прямой гидролопаты

Коэффициент	Угол поворота					
	45°	60°	75°	90°	120°	180°
Коэффициент	1,16	1,10	1,05	1,00	0,94	0,83

Table 10
Correction coefficients for rotation and digging of hydraulic shovel

Таблица 12
Уточняющие коэффициенты для определения средней нагрузки в ковше

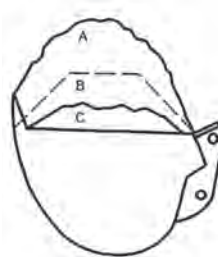
Table 12
Correcting coefficients for determining the average load in the bucket

Таблица 11
Коэффициент наполнения ковша

Материал	Коэффициент наполнения ковша
Обычный грунт, супесь	0,80–1,10
Песок и гравий	0,90–1,00
Тяжелая глина	0,65–0,95
Влажная глина	0,50–0,90
Хорошо взорванные породы	0,70–0,90
Плохо взорванные породы	0,40–0,70

Table 11
Bucket fill ratio

Материал	Диапазон изменения коэффициента наполнения $K_{н.к}$ (% от вместимости ковша «с шапкой»)
Влажный суглинок, супесь	A – 100–110%
Песок и гравий	B – 95–110%
Плотные глины	C – 80–90%
Хорошо взорванная порода	60–75%
Плохо взорванная порода	40–50%



Исходя из приведенных выше данных можно сделать промежуточный вывод:

Производительность рассчитывается крайне усредненно. Всё, что связано с буровзрывной подготовкой пород, учитывается только как «хорошо взорванные породы» и

Что же касается вместимости ковша с шапкой, то из вышеприведенного рисунка в таблице следует, что «шапка» может быть трех видов в зависимости от типа грузимого материала – полное наполнение ковша обеспечивается при погрузке влажного суглинка или супеси (тип А) и песка и гравия (тип В) – 100–110 и 95–110% соответственно. При разработке плотных глин (тип С) коэффициент наполнения ковша не превышает 0,8–0,9 дол. ед., а если расчет идет для взорванных пород, то $K_{н.к} = 0,4-0,75$, а тип материала (по идее, D и E) просто не приводится.

Авторы считают необходимым привести некоторые пояснения по вместимостям ковша по SAE и пр.

Komatsu, Hitachi и остальные зарубежные производители используют две вместимости ковша: геометрическая (struck) и с шапкой (heaped). Геометрическая используется мало где (типа паспортной производительности), с шапкой – везде. Разница в стандартах – в таблице. Четыре стандарта полностью одинаковые, европейский имеет одно отличие (табл. 13).

ISO – Международная организация по стандартизации – стандарты ISO 7451 и ISO 7546

JIS – Промышленный стандарт Японии – стандарт JIS A8401-1976

PCSA – Ассоциация производителей подъемных кранов и экскаваторов (США) – стандарт PCSA №37-26

SAE – Общество автомобильных инженеров (США) – стандарт SAE J296/J742b

CECE – Комитет по европейскому строительному оборудованию – стандарт CECE, раздел VI

Таблица 13
К расчету вместимости ковша «с шапкой» в различных системах стандартов

Тип ковша	Стандарт				
	ISO	JIS	PCSA	SAE	CECE
Ковш обратной лопаты	1:1	1:1	1:1	1:1	1:2
Ковш прямой лопаты	1:2	1:2	1:2	1:2	1:2

Возьмем для изучения более распространенный стандарт SAE. Суть его в вот в чем. Дополнительный объем («шапка») считается как призма с заложением граней 1:1 для обратной лопаты и 1:2 для прямой. То есть объем этой шапки зависит только от геометрических параметров ковша, а тип, свойства породы и прочие факторы не учитываются.

Приведем также поясняющий рисунок (рис. 1).

Вместимость ковша, названную struck capacity, на русский перевести можно как геометрическая вместимость или вместимость без верха.

Вместимость heaped capacity (вместимость «с шапкой»), по определению тех же Komatsu, представляет собой сумму геометрической вместимости и объема материала, насыпанного поверх, с заложением откоса 1:2 (см. рис. 1).

Однако, как отмечают сами производители, «Это ни в коем случае не означает, что экскаватор должен перемещать ковш именно в таком положении, или что весь материал будет иметь естественный угол откоса 1:2»³. Поэтому, как было сказано выше, определение вместимости ковша «с шапкой» для гидравлических экскаваторов вызывает своего рода затруднения. Здесь имеется в виду то, что, к

³ Komatsu. Komatsu Specifications and Application. 24th ed. Komatsu; 2009.

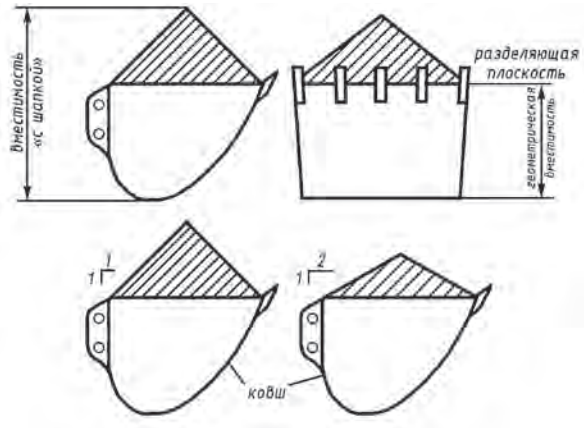


Рис. 1
Поясняющая схема к определению вместимости ковша геометрической и «с шапкой»

Fig. 1
Illustrative diagram for determining the struck capacity and heaped capacity of the bucket

примеру, для мехлопат разработана подробная система рекомендаций по выбору коэффициента экскавации, представляющего собой отношение коэффициента наполнения ковша и коэффициента разрыхления породы в ковше экскаватора. Для зарубежных гидравлических экскаваторов (а таковых отечественных попросту нет, не считая единичных опытных моделей) данная система отсутствует.

Собственно, приведенная формула тоже малоинформативна:

$$Vh = Vs + Ve,$$

где Vs – геометрическая вместимость ковша, Ve – избыточный объем породы, насыпанный с заложением 1:2 или 1:1.

Несколько в ином ключе сформированы предложения Caterpillar⁴ (табл. 14). Эта фирма рекомендует следующее:

⁴ Caterpillar performance handbook. Peoria, Illinois. Caterpillar Inc.; 2008

Таблица 14
Рекомендации фирмы-производителя Caterpillar для наилучших условий работы экскаватора

Table 14
Caterpillar manufacturer's recommendations for best excavator operating conditions

Иллюстрация к рекомендации	Рекомендация
	Идеальная высота уступа и расстояние до автосамосвала. Для разработки устойчивых или уплотненных пород высота уступа должна быть равна длине рукояти. Для разработки неустойчивых пород высота должна быть уменьшена. Максимально рациональная установка автосамосвала – когда внутренний борт кузова находится под шарниром «стрела-рукоять»
	Оптимальная рабочая зона и угол поворота. Для достижения максимальной производительности рабочая зона должна быть ограничена углом 15° от оси движения автосамосвала или примерно должна быть равной ширине его шасси. Автосамосвалы должны располагаться как можно ближе к оси поворота экскаватора
	Наилучшее расстояние от бровки. Экскаватор должен располагаться так, чтобы при полной загрузке ковша рукоять была в вертикальном положении. Если экскаватор расположен дальше – снижается усилие отрыва; если ближе – происходит подрезка забоя, что ведет к потерям времени на возврат рукояти в исходное положение. Кроме того, машинист экскаватора должен начать выполнять подъем стрелы в тот момент, когда ковш описал три четверти дуги своего поворота. Это должно происходить в тот момент, когда рукоять принимает вертикальное положение

Таблица 15
Классификация условий
работы экскаватора

Table 15
Classification of excavator
working conditions

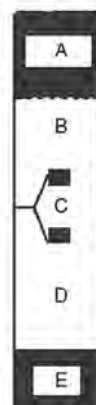
Тип работы	Классификация
А. Легкие земляные работы	Неуплотненный грунт, песчано-гравийная смесь, зачистка траншей и т.д. Земляные работы до глубины менее 40% максимальной глубины копания. Угол поворота менее 30°. Выгрузка на грунт или работа с нижней погрузкой в транспортные средства. Отсутствие препятствий и помех. Хорошая квалификация машиниста
В. Среднетяжелые земляные работы	Уплотненный грунт, сухая крепкая глина, грунты с содержанием скальных пород менее 25%. Глубина до 50% максимальной глубины копания. Угол поворота до 60°. Большая зона разгрузки. Небольшое количество препятствий и помех
С. Земляные работы от среднетяжелых до тяжелых	Крепкий уплотненный грунт с содержанием скальных пород до 50%. Глубина до 70% максимальной глубины копания. Угол поворота до 90°. Погрузка в самосвалы, расположенные близко к экскаватору
Д. Тяжелые земляные работы	Взорванная скальная порода или крепкий грунт с содержанием скальных пород до 75%. Глубина до 90% максимальной глубины копания. Угол поворота до 120°. Огражденная траншея (стесненные условия). Небольшая зона выгрузки. Работа над бригадой монтажников трубопроводов
Е. Сверхтяжелые земляные работы	Песчаник, сланец, известняки, крепкий мерзлый грунт. Глубина более 90% максимальной глубины копания. Поворот свыше 120°. Выгрузка в небольшой зоне при максимальном радиусе разгрузки. Наличие людей и препятствий в зоне работы

Наименьшая
возможная
(длительность
цикла)

Наименьшая
практическая

Типовой
диапазон

Большая



345C	365C	385C	ДЛИТЕЛЬ НОСТЬ ЦИКЛА
			0,17 мин
		A	0,25 мин
		B	0,33 мин
		C	0,42 мин
		D	0,50 мин
			0,58 мин
		E	0,67 мин
			0,75 мин
			0,83 мин
			0,92 мин
			1,0 мин

Рис. 2
Определение времени цикла
экскаватора согласно
классификации условий его
работы

Fig. 2
Determination of the
excavator cycle time
according to the classification
of its working conditions

Komatsu⁷. В этом справочнике прямо указывается, что производительность карьерных экскаваторов следует рассчитывать по количеству груженых самосвалов в час.

Часовая производительность:

$$Q_h = T_n \cdot T_q \cdot E,$$

где T_q – грузоподъемность автосамосвала, т; E – время использования в час, %; T_n – теоретически возможное число загружаемых автосамосвалов в час:

$$T_n = \frac{3600}{t_T + t_{sp}},$$

где t_{sp} – время постановки самосвала под погрузку, с; t_T – время погрузки автосамосвала, с,

$$t_T = \left(\frac{T_q}{B_c \cdot K \cdot \rho_{loose}} \right)^* \cdot t_c,$$

где B_c – вместимость ковша экскаватора, м³; K – коэффициент наполнения ковша, %; t_c – время цикла, с; ρ_{loose} – насыпная плотность (плотность в разрыхленном состоянии), т/м³; звездочка (*) означает, что результат в скобках округляется до целого числа.

Годовая производительность рассчитывается исходя из определенного количества моточасов в год:

$$Q_y = Q_h \cdot (h_y - h_s) \cdot S_a \cdot M,$$

где h_y , h_s – количество моточасов в год расчетное и фактическое соответственно; S_a – коэффициент готовности (в буквальном переводе – доступности) экскаватора, %; M – эффективность работы разреза, %.

Проблема в том, что в справочнике (как в русской, так и в английской версиях) отсутствуют указания на величины S_a и M .

Рассмотрим еще один источник, относящийся к классическим [16]. В нем сразу же отмечается многообразие единиц измерения – тонны, короткие тонны, кубические метры, кубические ярды, футы, дюймы и т.д. Лишь в неко-

Однако сразу после этих рекомендаций поясняется: «Приведенные примеры отражают реальную ситуацию. Не все рекомендации осуществимы во всех работах, но выполнение максимально возможного количества этих рекомендаций положительно влияет на производительность»⁵.

Длительность цикла у Caterpillar также принимается по данным табл. 15 и рис. 2.

На рис. 2 представлен простейший инструментарий от Caterpillar для определения времени цикла⁶.

Принимая во внимание, что условия работы на разрезе можно отнести к 4–5-й категориям, для экскаватора Cat 385C время цикла составит 0,54–0,7 мин (32–42 с), что примерно соответствует реальным значениям. Однако, как следует из описания Caterpillar, всё задаётся под предельно усредненные условия.

Определенный интерес вызывает подход к делу фирмы

5 Caterpillar performance handbook. Peoria, Illinois. Caterpillar Inc.; 2008.
6 Caterpillar performance handbook. Peoria, Illinois. Caterpillar Inc.; 2008.

7 Komatsu. Komatsu Specifications and Application. 24th ed. Komatsu; 2009.

торых местах встречается нормальное пояснение того, что, например, плотность 3000 фунтов на кубический ярд соответствует 1,78 т/м³. Однако также стоит изучить пояснения, касающиеся терминологии, для большего ее понимания и возможности проецирования расчетов производительности один на другой.

«Перед описанием процедуры расчета выработки лопаты важно дать некоторые определения [16].

«Естественное» и «разрыхленное» состояние.

На разрезе порода, которая должна быть загружена в ковш, как правило, сначала разрыхляется из положения «на месте» (in situ) или «в забое». В горной промышленности это часто достигается путем взрывных работ. Предположим, что в забое материал, занимающий объем в 1 кубический ярд (обозначается как 1 естественный кубический ярд, или 1 bcy – bank cubic yard), будет занимать больший объем в рыхлом состоянии. Вес одного кубического ярда сыпучего материала (1 lcy – loose cubic yard) из-за наличия пустот (воздушных пространств) между кусками, будет меньше, чем вес 1 bcy. Значения естественной и насыпной плотности для различных материалов приводятся в соответствующих таблицах.

Разрыхление.

Разрыхление определяют как отношение плотностей естественной и насыпной. Коэффициент разрыхления – величина, обратная разрыхлению».

Иными словами, *разрыхление*, описанное в [16], и отечественный *коэффициент разрыхления* – практически одно и то же.

«Наполнение» или «коэффициент наполнения» – еще одна величина, которую необходимо учитывать при расчете производительности. Наполнение представляет собой отношение объема породы в рыхлом состоянии, находящегося в ковше, к геометрической (номинальной) вместимости ковша. Обычно стремятся довести величину наполнения до геометрической вместимости. При оценке коэффициента наполнения используют следующие положения:

- 1) типичное значение составляет около 0.85, иногда выше;
- 2) коэффициент наполнения имеет большее значение для материала, имеющего меньшую категорию по экскавации, и наоборот;
- 3) коэффициент наполнения выше для более хрупкой породы;
- 4) коэффициент наполнения больше для экскаваторов с более вместительными ковшами, и наоборот.

Согласно [16] обычно в горном деле производительность за один цикл рассчитывают в тоннах:

$$T_c = B_c \cdot F_f \cdot W_B \cdot S_w,$$

где B_c – геометрическая вместимость ковша, м³ (ярд³); F_f – коэффициент наполнения ковша; W_B – плотность, т/м³ (фунт/ярд³); S_w – коэффициент разрыхления.

При строительстве эту же производительность обычно считают в кубометрах, а из формулы, соответственно, исключают плотность и записывают как

$$T_c = B_c \cdot F_f \cdot S_w,$$

Соответственно, чтобы получить объем производства за определенный период времени, например, за одну смену, нужно просто умножить объем производства за цикл на количество циклов в данном периоде времени. Но каким образом можно получить реальное количество циклов – остается лишь догадываться. Опять же, о каких-то поправочных коэффициентах, учитывающих, например, геологию месторождения, буровзрывные работы, влияние ширины заходки или перегон экскаватора [17–21], речи нет совершенно.

Выводы

Все вышеописанное свидетельствует о том, что:

1. Эксплуатационная производительность гидравлического экскаватора при погрузке в автотранспорт (сменная, суточная и т.д.) обычно рассчитывается по месту (по факту) с учетом ряда поправочных коэффициентов, каждый из которых может приниматься индивидуально как фирмой-производителем выемочного оборудования, так и горным предприятием, на котором работает выемочная техника.
2. Применение неадаптированных методик расчета производительности одноковшовых экскаваторов любых типов (и любых фирм-производителей) приведет к значительным погрешностям получаемых результатов.
3. Необходима разработка унифицированной адаптационной базы данных и расчетных формул, учитывающей разночтения как фирм-производителей, так и справочников по горному делу.
4. Для облегчения понимания и приведения в соответствие горной терминологии необходимо создание краткого глоссария с установленным соответствием (или, наоборот, разночтением) между русскоязычными и англоязычными терминами с возможностью его последующего использования в научных, производственных, а также учебных целях.

Список литературы

1. Литвин О.И., Литвин Я.О., Тюленев М.А., Марков С.О. Об определении параметров забойных блоков при ведении горных работ обратными гидравлическими лопатами. *Горная промышленность*. 2021;(6):76–81. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-76-81>
2. Макридин Е.В., Тюленев М.А., Марков С.О., Лесин Ю.В., Мурко Е.В. Использование вскрышных пород для повышения экологической безопасности угледобывающего региона. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(12):89–102. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-89-102>
3. Murko E., Kalashnikov V., Gorbachev A., Mukhomedzyanov I. Using of Shell Filtering Constructions for Concentrating Plant's Coal Slurry Dewatering. *E3S Web of Conferences*. 2019;105:02029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910502029>

4. Martyanov V.L., Markov S.O., Kolesnikov V.F., Tyuleneva E.A., Cehlár M., Janočko J., Márasová D., Cagaňová D. Study of inclined deposits opening under the combined mining system: Kureinsky area case-study. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2021;(4):64–88. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2021-4-64-88>
5. Janosevic D., Mitrev R., Andjelkovic B., Petrov P. Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency. *Journal of Zhejiang University: Science A*. 2012;13(12):926–942. <https://doi.org/10.46544/AMS.v27i2.02>
6. Мильный С.М. Оценка технологии отработки крутонаклонных угольных месторождений Кузбасса. *Техника и технология горного дела*. 2020;(1):45–73. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2020-1-45-73>
7. Ulewicz, R., Krstić, B. and Ingaldi, M. Mining Industry 4.0 – Opportunities and Barriers. *Acta Montanistica Slovaca*. 2022;27(2):291–305.
8. Özdoğan M., Özdoğan H. Cycle time segments of electric rope shovels – a case study. *Scientific Mining Journal*. 2019;58(1):73–79. <https://doi.org/10.30797/madencilik.537648>
9. Клементьева И.Н., Кузиев Д.А. Выемочно-погружной драглайн с ковшом инновационной конструкции. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019;(7):149–157. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-07-0-149-157>
10. Ključnikov A., Civelek M., Krajčík V., Ondrejmišková I. Innovative Regional Development of the Structurally Disadvantaged Industrial Region by the Means of the Local Currency. *Acta Montanistica Slovaca*. 2020;25(2):224. <https://doi.org/10.46544/AMS.v25i2.9>
11. Mitrev R., Janošević D., Marinković D. Dinamičko modeliranje hidrauličnog bagera kao sustava sastavljenog od više tijela. *Tehnički Vjesnik*. 2017;24(Suppl. 2):327–338. <https://doi.org/10.17559/TV-20151215150306>
12. Дубинкин Д.М. Методика определения нагрузок, действующих при погрузке и разгрузке грузовой платформы (кузова) карьерного самосвала. *Горное оборудование и электромеханика*. 2022;(3):31–49. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2022-3-31-49>
13. Tyulenev M.A., Markov S.O., Gasanov M.A., Zhironkin S.A. Numerical modeling in the structural study of technogenic rock array. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018;36(5):2789–2797. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0501-3>
14. Nunnally S.W. *Construction methods and management*. Pearson Prentice Hall; 2007. 575 p.
15. Chen W.F., Richard Liew J.Y. (eds) *The civil engineering handbook*. CRC Press; 2002. 2904 p.
16. Hustrulid W., Kuchta M., Martin R. *Open Pit Mine Planning & Design*. CRC Press; Taylor & Francis; 2013. 1306 p.
17. Hödaverdi T., Akylidiz O. Investigation of blast fragmentation models in a sandstone quarry. *Scientific Mining Journal*. 2020;59(3):145–156. <https://doi.org/10.30797/madencilik.792386>
18. Kolesnikov V., Litvin O., Janočko J., Efremenkov A. Using of wide stopes in coal zones mined by shovels and backhoes. *E3S Web of Conferences*. 2017;21:01031. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172101031>
19. Кацубин А.В., Хорешок А.А., Тюленев М.А., Марков С.О. Технология опережающей выемки наклонных и крутых угольных пластов обратными гидравлическими лопатами. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(11):27–36. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-11-0-27-36>
20. Ключев Р.В., Босиков И.И., Юн Р.Б. Анализ функционирования природно-промышленной системы горно-металлургического комплекса с помощью показателя сложности геологического строения месторождения. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2016;8(3):222–230. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2016-8-3-222-230>
21. Bettens S.P., Siegrist P.M., McAree P.R. How do operators and environment conditions influence the productivity of a large mining excavator? *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2022;13(1):18–36. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2022.10048881>

References

1. Litvin O.I., Litvin Ya.O., Tyulenev M.A., Markov S.O. On determining the parameters of face blocks during mining operations with backhoes. *Russian Mining Industry*. 2021;(6):76–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2021-6-76-81>
2. Makridin E.V., Tyulenev M.A., Markov S.O., Lesin Y.V., Murko E.V. Overburden management towards higher safety in coal mining regions. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(12):89–102. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-12-0-89-102>
3. Murko E., Kalashnikov V., Gorbachev A., Mukhomedzyanov I. Using of Shell Filtering Constructions for Concentrating Plant's Coal Slurry Dewatering. *E3S Web of Conferences*. 2019;105:02029. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910502029>
4. Martyanov V.L., Markov S.O., Kolesnikov V.F., Tyuleneva E.A., Cehlár M., Janočko J., Márasová D., Cagaňová D. Study of inclined deposits opening under the combined mining system: Kureinsky area case-study. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2021;(4):64–88. <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2021-4-64-88>
5. Janosevic D., Mitrev R., Andjelkovic B., Petrov P. Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency. *Journal of Zhejiang University: Science A*. 2012;13(12):926–942. <https://doi.org/10.46544/AMS.v27i2.02>
6. Милий С. Evaluation of technology for development of inclined and steep coal deposits in Kuzbass. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2020;(1):45–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/2618-7434-2020-1-45-73>
7. Ulewicz, R., Krstić, B. and Ingaldi, M. Mining Industry 4.0 – Opportunities and Barriers. *Acta Montanistica Slovaca*. 2022;27(2):291–305.
8. Özdoğan M., Özdoğan H. Cycle time segments of electric rope shovels – a case study. *Scientific Mining Journal*. 2019;58(1):73–79. <https://doi.org/10.30797/madencilik.537648>
9. Klementyeva I.N., Kuziev D.A. Extracting-and-loading dragline with innovative design bucket. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019;(7):149–157. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-07-0-149-157>
10. Ključnikov A., Civelek M., Krajčík V., Ondrejmišková I. Innovative Regional Development of the Structurally Disadvantaged Industrial Region by the Means of the Local Currency. *Acta Montanistica Slovaca*. 2020;25(2):224. <https://doi.org/10.46544/AMS.v25i2.9>
11. Mitrev R., Janošević D., Marinković D. Dinamičko modeliranje hidrauličnog bagera kao sustava sastavljenog od više tijela. *Tehnički Vjesnik*. 2017;24(Suppl. 2):327–338. <https://doi.org/10.17559/TV-20151215150306>
12. Dubinkin D.M. Method of determining the loads acting during loading and unloading of the cargo platform (body) career self-dump. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2022;(3):31–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2022-3-31-49>

13. Tyulenev M.A., Markov S.O., Gasanov M.A., Zhironkin S.A. Numerical modeling in the structural study of technogenic rock array. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2018;36(5):2789–2797. <https://doi.org/10.1007/s10706-018-0501-3>
14. Nunnally S.W. *Construction methods and management*. Pearson Prentice Hall; 2007. 575 p.
15. Chen W.F., Richard Liew J.Y. (eds) *The civil engineering handbook*. CRC Press; 2002. 2904 p.
16. Hustrulid W., Kuchta M., Martin R. *Open Pit Mine Planning & Design*. CRC Press; Taylor & Francis; 2013. 1306 p.
17. Hödaverdi T., Akyildiz O. Investigation of blast fragmentation models in a sandstone quarry. *Scientific Mining Journal*. 2020;59(3):145–156. <https://doi.org/10.30797/madencilik.792386>
18. Kolesnikov V., Litvin O., Janočko J., Efremenkov A. Using of wide stopes in coalless zones mined by shovels and backhoes. *E3S Web of Conferences*. 2017;21:01031. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172101031>
19. Katsubin A.V., Khoreshok A.A., Tyulenev M.A., Markov S.O. Technology of advance cutting of sloping and steeply pitching coal seams using hydraulic backhoe excavators. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(11):27–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-11-0-27-36>
20. Kluyev R.V., Bosikov I.I., Youn R.B. Analysis of the functioning of the natural-industrial system of mining and metallurgical complex with the complexity of the geological structure of the deposit. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2016;8(3):222–230. (In Russ.)
21. Bettens S.P., Siegrist P.M., McAree P.R. How do operators and environment conditions influence the productivity of a large mining excavator? *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2022;13(1):18–36. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2022.10048881>

Информация об авторах

Литвин Олег Иванович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры открытых горных работ, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

Хорешок Алексей Алексеевич – доктор технических наук, профессор, директор Горного института, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-3261-0933>

Дубинкин Дмитрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры металлорежущих станков и инструментов, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-8193-9794>, e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Марков Сергей Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент инженерно-экономической кафедры, филиал Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева в г. Междуреченске, г. Междуреченск, Российская Федерация

Стенин Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, директор института информационных технологий, машиностроения и автотранспорта, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация

Тюленев Максим Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры открытых горных работ, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово, Российская Федерация; e-mail: tma.geolog@kuzstu.ru

Information about the authors

Oleg I. Litvin – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Senior Researcher, Department of Open Pit Mining, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

Alexey A. Khoreshok – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Mining Institute, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-3261-0933>

Dmitry M. Dubinkin – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of metal-cutting machines and tools, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-8193-9794>, e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Sergei O. Markov – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Engineering and Economic Department, Mezhdurechensk Branch of the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Mezhdurechensk, Russian Federation

Dmitry V. Stenin – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Director of Institute of IT, Mechanical Engineering and Motor Vehicles, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation

Maxim A. Tyulenev – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Department of Open Pit Mining, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russian Federation; e-mail: tma.geolog@kuzstu.ru

Article info

Received: 25.09.2022

Revised: 10.10.2022

Accepted: 10.10.2022

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.09.2022

Поступила после рецензирования: 10.10.2022

Принята к публикации: 10.10.2022