ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(1):27-42
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.271 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_27

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХЛОПАТ ДЛЯ РАЗРЕЗОВ КУЗБАССА

В.В. Чаплыгин[1], А.А. Садыков[1], А.В. Матвеев[1]

[1] Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, e-mail: artur.aleksovich@gmail.com

Аннотация: Данная статья является итоговой, завершающей цикл исследований по обоснованию оптимальных параметров экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат в условиях разрезов Кузбасса. В работе представлено решение ряда задач, таких как разработка единой формулы для расчета производительности современных мехлопат с вместимостью ковша от 6,3 до 55,8 м^3; опытно-промышленная проверка достоверности результатов расчета; разработка алгоритма и методики; определение оптимальных параметров комплекса для каждого типа современных мехлопат в горнотехнических условиях Кузбасса; разработка экспресс-метода–номограммы для выбора типа экскаватора или их количества при проектировании или планировании горных работ. Определены графические зависимости изменения удельных эксплуатационных затрат на разработку одного кубометра вскрыши в условиях разрезов Кузбасса от величины средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы для экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат с вместимостью ковша 6,3÷55,8 м^3 для двух категорий пород – IV и III. Приведены конкретные рекомендации и изложены все аспекты и результаты работы, которые будут полезны как для проектировщиков, так и для плановиков горных предприятий. Использование результатов работы позволит определять оптимальные параметры экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат при перевооружении карьера в зависимости от поставленной задачи.

Ключевые слова: экскаваторно-автомобильный комплекс, параметры технологии, механическая лопата, оптимизация, удельные эксплуатационные затраты, параметры для комплексов Кузбасса, блок-схема алгоритма, средневзвешенный кусок взорванной горной массы, производительность экскаватора.

Для цитирования: *Чаплыгин В. В., Садыков А. А., Матвеев А. В.* Результаты работы по обоснованию параметров экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат для разрезов Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 1. – С. 27–42. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_27.

Working results on justification of power shovel–truck system parameters for open pit mines in Kuzbass

V.V. Chaplygin[1], A.A. Sadykov[1], A.V. Matveev[1]

[1] Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia, e-mail: artur.aleksovich@gmail.com

Abstract: This article is a summary of the research aimed at justification of optimal parameters of power shovel–truck systems for open pit mines in Kuzbass. The article presents solutions for such problems as: development of a common formula to calculate an actual output of power shovels with a bucket capacity from 6.3 to 55.8 m^3; pilot testing of reliability of calculated results; development of an algorithm and a procedure; determination of optimal parameters of the power shovel–truck system for each model of modern power shovels for geotechnical conditions in Kuzbass; development of a rapid method–nomogram for selecting a type and number of power shovels at the stages of mine planning and design. The curves of the cost to remove one cubic meter overburden and the weight-average size of blasted rocks in the conditions of open pit mining in Kuzbass using trucks and power shovels with the bucket capacity of 6.3–55.8 m^3 are plotted for rock categories IV and III. Specific recommendations are given, and all aspects and results of the work, to be useful for both designers and planners of mines, are set forth. The use of the work results can facilitate determination of the optimal parameters of power shovel–truck systems in technical upgrading of open pit mines depending on an assigned objective.

Key words: shovel–truck system, technology parameters, power shovel, optimization, cost per unit, parameters for mining systems in Kuzbass, flow diagram, weight-average size of blasted rocks, power shovel output.

For citation: Chaplygin V. V., Sadykov A. A., Matveev A. V. Working results on justification of power shovel–truck system parameters for open pit mines in Kuzbass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(1):27-42. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_1_0_27.

Введение

Экскаваторы, работающие на электроэнергии, являются основным выемочно-погрузочным оборудованием на карьерах [1].

Разрезы Кузбасса укомплектованы в основном экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат (ЭАКМЛ) [2—4]. Для добычи угля практически повсеместно применяются обратные гидравлические лопаты [5—8]. При этом разработка более 80% пород III и IV групп по взрываемости осуществляется с применением буровзрывных работ (БВР).

Применяются мехлопаты с вместимостью ковша от 6,3 до 55,8 $м^3$, автосамосвалы грузоподъемностью от 90 до 360 т, станки для бурения скважин диаметром от 170 до 270 мм, а также различные типы бульдозеров для выполнения отвальных работ.

В такой ситуации возникает необходимость определить оптимальные параметры процессов для каждого из них в конкретных условиях разреза, а также провести сравнение комплексов между собой.

Практически все вскрышные работы на разрезах Кузбасса производятся с помощью буровзрывных работ, поэтому основным процессом исследуемой технологии можно считать процесс буровзрывной подготовки пород к выемке. Этот процесс характеризуется рядом параметров, такими как $d_{скв}$ — диаметр скважин, $L_{скв}$ — глубина скважины, сетка скважин (a, b, W) и еще такими параметрами, которые можно считать одними из главных: q — удельный расход взрывчатых веществ (ВВ) и $d_{ср}$ — средний размер кусков взорванных пород. Удельный расход взрывчатых веществ определяет издержки по процессу БВР,

а $d_{ср}$ принят как критерий, характеризующий качество произведенной буровзрывной подготовки пород к выемке и позволяющий учитывать эти затраты по вариантам. Величина $d_{ср}$, определяя значение $K_э$ — коэффициента экскавации — позволяет установить производительность мехлопаты $Q_э$ для принятого варианта (величины q) и с учетом количества автосамосвалов $N_а$, бульдозеров $N_б$, задействованных в ЭАКМЛ (по величине критерия $d_{ср}$) осуществляет взаимосвязь всех процессов и дает возможность определить суммарные удельные эксплуатационные затраты (издержки) по всем процессам исследуемой технологии для принятого варианта.

От кусковатости взорванных пород зависит производительность экскаватора, а точнее, величина коэффициента экскавации и время, затрачиваемое на набор ковша (при достаточной высоте уступа), и производительность определяет величину затрат по процессу.

Основными параметрами, которые характеризуют процесс экскавации, являются: $H_у$ — высота разрабатываемого уступа, E — вместимость ковша экскаватора, $T_ц$ — время цикла экскаватора, соответствующее принятой организации работ (параметр $\beta_п$ — угол поворота экскаватора при погрузке). Все они, включая $K_э$, влияют на изменение производительности экскаватора $Q_э$, которая соответствует величине среднего размера кусков взорванных пород. Кроме того, величина $Q_э$ связана с основными параметры следующего процесса (и определяет их) — перемещение карьерных грузов, влияя на $T_п$ — время погрузки одного автосамосвала и на $N_а$ — количество автосамосвалов. С другой стороны, количество автосамосвалов зависит от $Q_а$ — производительности одного автосамосвала, а она определяется его грузоподъемностью $P_а$, расстоянием транспортирования $L_{тр}$ и, опять же, $T_п$, которая также зависит от $d_{ср}$ и определяет затраты на автотранспорт — $C_{тр}$.

Процесс отвалообразования и затраты по процессу — $C_{от}$ — напрямую зависят от $Q_э$, так как определяют количество бульдозеров при принятой системе организации процесса. Следовательно, установленные взаимосвязи всех основных процессов для каждого варианта, который характеризуется определенной величиной среднего размера кусков взорванных пород, в зависимости от параметров каждого из процессов исследуемой технологии и затрат по нему позволяют установить суммарные издержки. Это означает, что минимальное значение среди них однозначно определит соответствующую величину среднего размера кусков взорванных пород, минимальную сумму затрат по технологии и ее оптимальные параметры.

Таким образом, величина среднего размера куска взорванной вскрышной породы определяет параметры каждого из процессов для применяемых технических средств с учетом физико-механических свойств разрабатываемых пород, которые обеспечивают оптимальные условия эксплуатации всего комплекса.

Принцип оптимизации параметров экскаваторно-автомобильного комплекса разреза, который заключается в определении минимума суммарных удельных затрат на разработку полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат и параметров каждого из процессов, должен обеспечить решение вопроса для любых применяемых технических средств с учетом физико-механических свойств разрабатываемых пород при обеспечении рациональных и безопасных условий эксплуатации комплекса.

Из анализа результатов выполненных ранее теоретических и экспериментальных работ по этой теме следует,

что решить задачу оптимизации параметров и сравнения ЭАКМЛ можно тогда, когда установлена зависимость производительности экскаватора от кусковатости взорванных горных пород.

Решение этой задачи позволит обосновать параметры технологии разработки полускальных вскрышных пород с помощью ЭАКМЛ, обеспечивающие минимальные затраты на разработку вскрыши в конкретных горнотехнических условиях эксплуатации.

Методы

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработка единой зависимости с целью расчета производительности для всех типов механических лопат, используемых на карьерах и разрезах, в зависимости от кусковатости взорванной горной массы;
- опытно-промышленная проверка разработанной зависимости и оценка достоверности полученных результатов расчета по формуле;
- разработка методики (алгоритмов) обоснования параметров и выбора технических средств экскаваторно-автомобильного комплекса с применением современных механических лопат;
- определение оптимальных параметров исследуемой технологии разработки взорванной горной массы с помощью ЭАКМЛ на разрезах Кемеровской области.

Ранее были проанализированы [9] имеющиеся методики расчета производительности экскаваторов-мехлопат [10—15]. В работе [16] отмечается важность согласования типов экскаватора и автосамосвала.

Далее была установлена формула для расчета величины сменной эксплуатационной производительности мехлопат с учетом коэффициента экскавации, который включает значение средневзвешенного размера кусков взорванных пород [17]:

$$Q_э = \frac{3600 \cdot E \cdot T_{см} \cdot \dfrac{0{,}22 \cdot E^{0{,}234}}{d_{ср}^{\frac{0{,}234}{E^{0{,}22}}}} \cdot K_з \cdot K_{иэ}}{\dfrac{67 d_{ср}^2}{E} + \dfrac{E}{0{,}11E + 0{,}6} + \sqrt[3]{\dfrac{\left(35 \cdot E + 0{,}42 \cdot E^2\right)^{\frac{5}{3}} \cdot \beta_n^2}{E}} + t_p}, \text{ м}^3/\text{см} \qquad (1)$$

где $T_{см}$ — продолжительность смены, ч; $K_з$ — коэффициент влияния параметров забоя; $K_{иэ}$ — коэффициент использования экскаватора в течение смены; $t_р$ — время разгрузки, с.

С целью подтверждения достоверности расчета по разработанной эмпирической зависимости, а также сравнения результата с ранее установленными формулами, была проведена опытно-промышленная проверка, включающая определение фактической производительности мехлопат на разрезах Кузбасса.

Методический подход к проведению опытно-промышленной проверки включал последовательную реализацию ряда этапов исследования:

- сбор данных о горнотехнических условиях работы, принятые параметры технологических схем и процессов, не составляющих коммерческую тайну предприятий;

• хронометражные наблюдения и определение значений коэффициента использования календарного времени экскаватором;

• расчет величины средневзвешенного размера куска взорванной горной массы с использованием программы «BlastMaker».

В процессе проведения хронометражных наблюдений за работой экскаватора на каждом блоке составлялась карта-фотография рабочего времени. Целью хронометражных наблюдений являлось определение коэффициента использования календарного времени ($K_и$) экскаватором.

Среднее значение коэффициента использования календарного времени при отработке блоков

$$K_{и\,ср} = \frac{\left[\left(V_1 K_{и1}\right) + \left(V_2 K_{и2}\right) + \left(V_3 K_{и3}\right)\right]}{V_1 + V_2 + V_3}$$

дол. ед., (2)

где V_1, V_2, V_3 — объемы взрываемого блока, м³; $K_{и1}$, $K_{и2}$, $K_{и3}$ — коэффициенты использования календарного времени при отработке блоков, дол. ед.

При этом сменная эксплуатационная производительность мехлопат определялась для каждого блока:

$$Q_{э\,см1} = \frac{V_1}{T_{кал}} T_{см} K_{и\,ср}\ , \text{м}^3/\text{см} \quad (3)$$

где $T_{кал}$ — календарный фонд времени, ч.

Среднее значение сменной эксплуатационной производительности мехлопат учитывает объемы каждого блока:

$$Q_{э\,см} = \frac{\left[\left(V_1 Q_{э\,см1}\right) + \left(V_2 Q_{э\,см2}\right)\right]}{V_1 + V_2}\ , \text{м}^3/\text{см} \quad (4)$$

где $Q_э$ см$_1$, $Q_э$ см$_2$ — сменная эксплуатационная производительность мехлопат, м³/см.

Для каждого исследуемого блока величина средневзвешенного размера куска взорванной горной массы опреде-

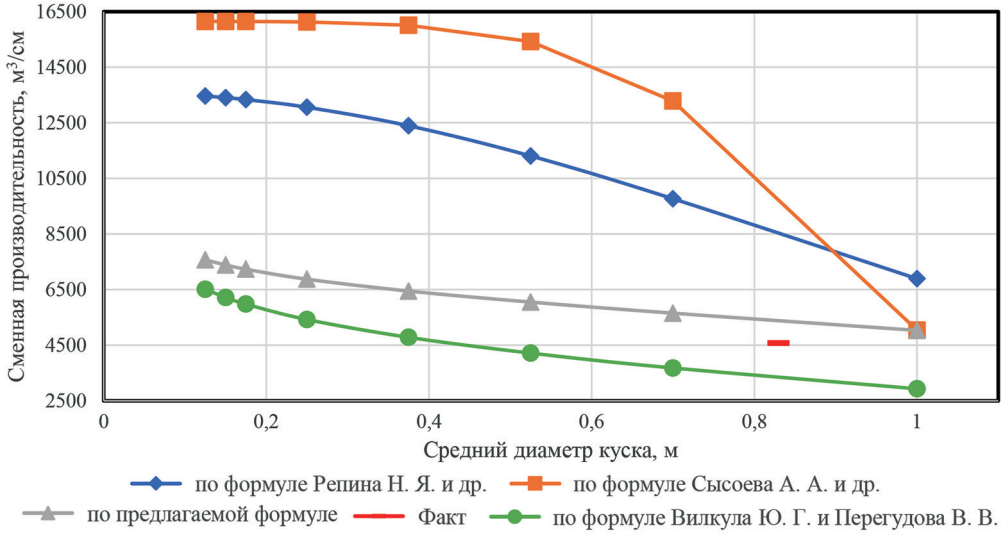


Рис. 1. Зависимость производительности механической лопаты с ковшом 15 м³ от средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы, полученная с помощью различных эмпирических формул, в сравнении с фактической производительностью на разрезах Кузбасса

Fig. 1. Dependence of the performance of a mechanical shovel with a bucket capacity of 15 m³ on the weighted average size of the exploded rock mass according to various empirical formulas, compared with the actual performance at Kuzbass quarries

Таблица 1

Результаты опытно-промышленной проверки фактической производительности экскаваторов на разрезах Кузбасса в зависимости от средневзвешенного размера кусков взорванных пород, рассчитанные по различным эмпирическим формулам
Results of an experimental and industrial test of the actual performance of excavators at Kuzbass quarries, depending on the weighted average size of blasted rock pieces calculated using various empirical formulas

Тип ЭКГ	$d_{ср}$, м	Факт $Q_{э\,см}$, м³/см	По формуле Н.Я. Репина и др.				По формуле А.А. Сысоева и др.				По новой предлагаемой универсальной формуле			
			$Q_{э\,см}$, м³/см	Ошибка опыта, Δy	$\lvert\Delta y^2\rvert$	Относительная ошибка, $\Delta y / У_ф$, %	$Q_{э\,см}$, м³/см	Ошибка опыта, Δy	$\lvert\Delta y^2\rvert$	Относительная ошибка, $\Delta y / У_ф$, %	$Q_{э\,см}$, м³/см	Ошибка опыта, Δy	$\lvert\Delta y^2\rvert$	Относительная ошибка, $\Delta y / У_ф$, %
ЭКГ-6,3	0,76	1 752	3 111	1 359	1 847 532	77,6	3 802	2 050	4 201 184	117	2 068	316	100 070	18,1
ЭКГ-8	0,78	2 520	4 200	1 680	2 823 664	66,7	4 608	2 088	4 360 119	82,9	2 716	196	38 250	7,8
ЭКГ-10	0,79	2 688	5 538	2 850	8 123 644	106	5 606	2 918	8 512 316	108,5	3 494	806	649 060	30
ЭКГ-12	0,81	3 348	6 737	3 389	11 487 427	101,2	6 327	2 979	8 874 514	89	4 246	898	806 027	26,8
ЭКГ-15	0,83	4 572	8 530	3 958	15 662 158	86,6	7 385	2 813	7 913 485	61,5	5 378	806	650 133	17,6
ЭКГ-18	0,85	4 716	10 222	5 506	30 313 349	116,7	8 246	3 530	12 457 477	74,8	6 494	1 778	3 159 712	37,7
ЭКГ-25	0,87	9 960	14 130	4 170	17 388 823	41,9	10 460	500	250 462	5	9 092	–868	754 000	–8,7
РН-2 800XPC (33 м³)	0,89	14 004	18 198	4 194	17 587 146	29,9	12 544	–1 460	2 132 480	–10,4	11 963	–2 041	4 163 755	–14,6
WK-45 (41,3 м³)	0,9	16 512	22 148	5 636	31 769 389	34,1	14 716	–1 796	3 226 180	–10,9	14 857	–1 655	2 740 677	–10
РН-4 100XPC (55,8 м³)	0,92	21 888	28 260	6 372	40 607 220	29,1	17 670	–4 218	17 788 282	–19,3	19 641	–2 247	5 051 069	–10,3
Среднее арифметическое по форм. *y*			12 107		177 610 352		9 136		69 716 499		7 995		18 112 754	

Среднее линейное отклонение ($\Sigma\Delta y / n$)				3 911				940				–201		
Среднеквадратическое отклонение			4 442				2 783				1 419			
Коэффициент вариации, %			36,7				30,5				17,7			

Таблица 2

Минимальные удельные эксплуатационные затраты и сменная производительность механических лопат
Minimum unit operating costs and replaceable performance of mechanical shovels

Группа пород	Параметр	Экскаваторы-мехлопаты									
		ЭКГ-6,3	**ЭКГ-8**	**ЭКГ-10**	**ЭКГ-12**	**ЭКГ-15**	**ЭКГ-18**	**ЭКГ-25**	**ЭКГ-33**	**ЭКГ-41,3**	**ЭКГ-55,8**
III	$d_{ср}$, м	0,525	0,525	0,525	0,700	0,700	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$Q_э$, м³/см	2461	3177	4009	4463	5654	6173	8786	11 683	14 584	19 402
	$Q_{э\ год}$, тыс. м³/год	1531	1976	2494	2776	3517	3839	5465	7267	9071	12 068
	$\Sigma C_{уд}$, руб./м³	132,99	131,62	104,51	90,77	78,42	75,67	73,14	69,33	55,00	46,60
IV	$d_{ср}$, м	0,525	0,525	0,700	0,700	0,700	0,700	1,000	1,000	1,000	1,000
	$Q_э$, м³/см	2461	3177	3662	4463	5654	6829	8786	11 683	14 584	194 02
	$Q_{э\ год}$, тыс. м³/год	1531	1976	2278	2776	3517	4248	5465	7267	9071	12068
	$\Sigma C_{уд}$, руб./м³	139,93	138,55	110,25	95,96	83,61	81,95	80,00	76,19	61,86	53,46

лялась с использованием программы «BlastMaker». В программу вводились фактические параметры БВР (диаметр и глубина скважин, схема расположения скважин, тип и масса используемого взрывчатого вещества (ВВ), способ инициирования), условия проведения взрывных работ и физико-механические свойства вскрышной породы (коэффициент крепости, плотность, трещиноватость). Программа «BlastMaker» позволяет осуществлять моделирование процесса дробления горной массы взрывом и определять гранулометрический состав взорванной породы, на основании которого выполняется расчет средневзвешенного размера кусков. В результате были получены значения производительности экскаваторов в производственных условиях, что позволило сравнить величину производительности каждого экскаватора в зависимости от размера куска взорванных пород, рассчитанную по различным формулам, с фактической производительностью на разрезах (см. табл. 1).

В результате были получены производительности экскаваторов в производственных условиях. На рис. 1 приведен пример зависимостей производительности механической лопаты с ковшом 15 м^3 от средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы, построенных по различным эмпирическим формулам, в сравнении с фактической производительностью на разрезах Кузбасса.

Полученные значения эксплуатационной сменной (при $T_{см}$ = 12 ч) производительности мехлопат от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород в конкретных горнотехнических условиях их работы на разрезах Кузбасса позволили установить упрощенную эмпирическую зависимость в виде функции

$$Q_{э\,см} = \frac{0,095E^{2,21}T_{см}}{d_{ср}^{12,10}} \text{ м}^3/\text{см}. \quad (5)$$

Эта формула (5), в отличие от предложенной нами (1), не позволяет не учитывать изменение коэффициентов экскавации и влияния параметров забоя.

С целью оценки достоверности разработанной эмпирической зависимости для расчета производительности мехлопат, а также сравнения ее точности с существующими подходами был проведен анализ отклонений расчетных значений от фактических данных, полученных в производственных условиях угольных разрезов Кузбасса. Для этого использовался коэффициент вариации.

Коэффициент вариации при расчете производительности экскаватора по методике Н.Я. Репина и др. в сравнении с фактическими значениями составляет 36,7%, при расчете по методике А.А. Сысоева и др. — 30,5%, по методике Ю.Г. Вилкула и В.В. Перегудова — 35,2%, а при расчете производительности по предлагаемой формуле с фактическими значениями — 17,7%.

Указанные результаты свидетельствуют о более высокой точности предложенной эмпирической зависимости по сравнению с существующими аналогами.

Результаты

Полученная формула для расчета производительности механических лопат с ковшами вместимостью 6,3÷55,8 м^3 в виде функции от средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы позволяет взаимоувязать параметры всех основных процессов технологии разработки пород экскаваторно-автомобильным комплексом, сравнивать различные варианты состава оборудования комплекса и оптимизировать суммарные издержки путем выбора их параметров. Она является основой разработанной методики, которая позволяет выбирать:

- удельный расход взрывчатых веществ;
- тип механической лопаты;

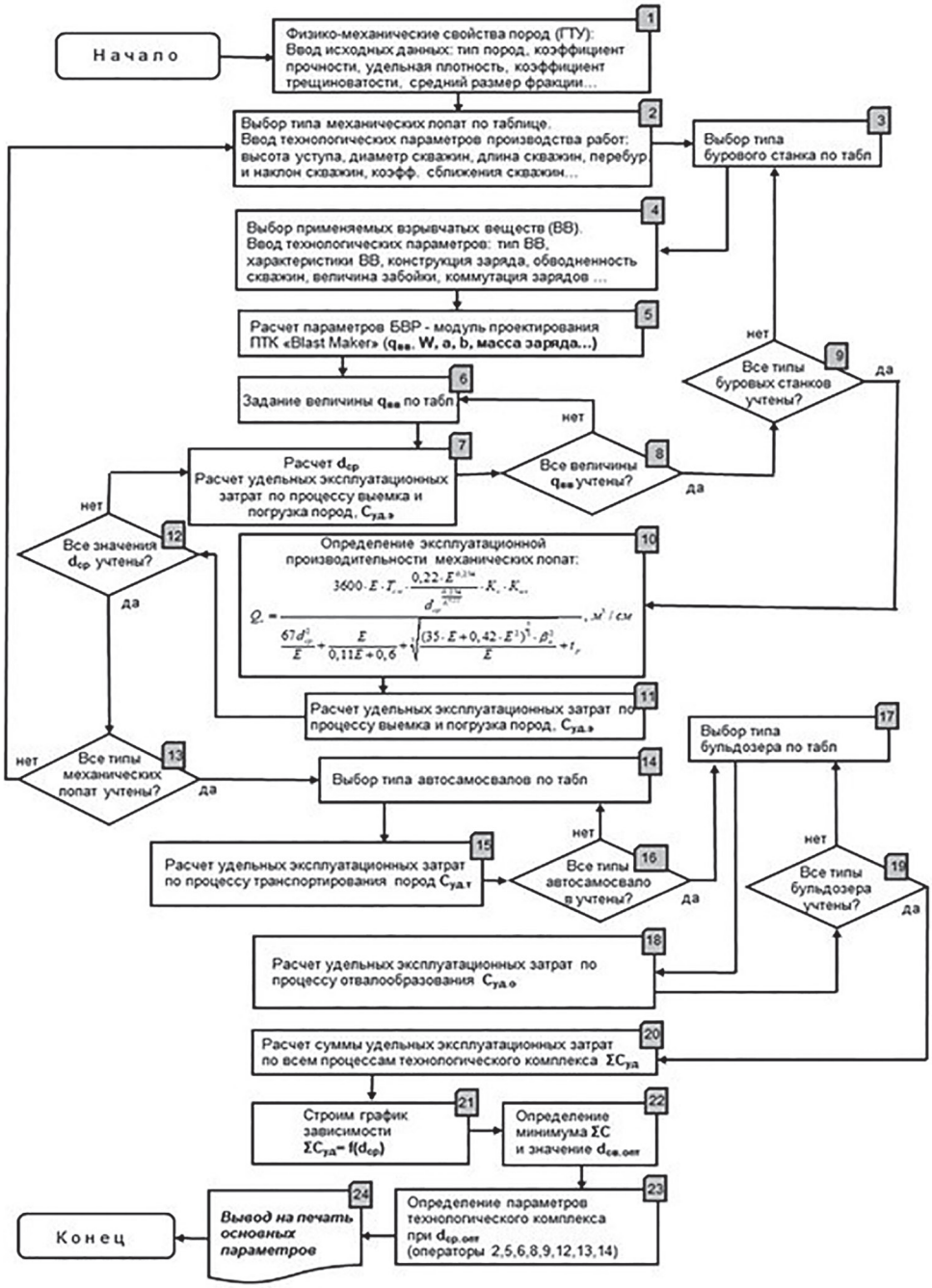


Рис. 2. Укрупненная блок-схема комплексного алгоритма оптимизации параметров ЭАКМЛ через выбор удельного расхода взрывчатых веществ, типа механической лопаты, автосамосвала, бурового станка и бульдозера

Fig. 2. An enlarged flowchart of a complex algorithm for optimizing the parameters of the EACMS through the selection of the specific consumption of explosives, such as a mechanical shovel, dump truck, drilling machine and bulldozer

• автосамосвал, буровой станок, бульдозер.

В том числе возможно решение комплексной задачи выбора комплексной механизации с учетом величины удельного расхода ВВ.

На рис. 2 изображена укрупненная блок-схема комплексного алгоритма оптимизации параметров ЭАКМЛ через выбор удельного расхода взрывчатых веществ, типа механической лопаты, автосамосвала, бурового станка и бульдозера.

В качестве методологической основы для оптимизации параметров ЭАКМЛ принят критерий минимизации суммарных удельных эксплуатационных затрат на разработку вскрышных пород, учитывающих затраты, связанные с реализацией каждого из основных технологических процессов, включая бурение, взрывание, экскавацию, транспортирование и отвалообразование.

Анализ экономических показателей и использование информационных продуктов — важная составляющая работы горнодобывающего предприятия [18]. Сумма фактической себестоимости складывается из затрат отдельных процессов [19].

Для решения сформулированной задачи оптимизации параметров ЭАКМЛ разработана математическая модель, в которой целевая функция представлена в виде минимизации суммарных удельных эксплуатационных затрат и имеет следующий вид:

$$C_{бвр} f\left(d_{ср}\right) + C_э f\left(d_{ср}\right) + C_т f\left(d_{ср}\right) + \\ + C_о f\left(d_{ср}\right) = \sum C_{уд} f\left(d_{ср}\right) \to min$$

руб./м^3, (6)

где $C_{бвр}f(d_{ср})$; $C_э f(d_{ср})$; $C_т f(d_{ср})$; $C_о f(d_{ср})$ — удельные затраты соответственно на БВР, экскавацию, перемещение карьерных грузов и отвалообразование, руб./м^3; $\Sigma C_{уд} f(d_{ср})$ — суммарные удельные затраты по всем процессам разработки, руб./м^3.

Порядок построения графиков изменения суммарных удельных эксплуатационных затрат с применением мехлопат при вместимости ковша экскаватора от E = 6,3 м^3 до E = 55,8 м^3.

1. В соответствии с заданными значениями величины средневзвешенного размера кусков в принятом диапазоне от 0,125 до 1,000 м (8 альтернативных вариантов) определяются параметры каждого из процессов и производительность комплекса (на основании установленной в диссертации формулы для расчета производительности механических лопат в зависимости от $d_{св}$).

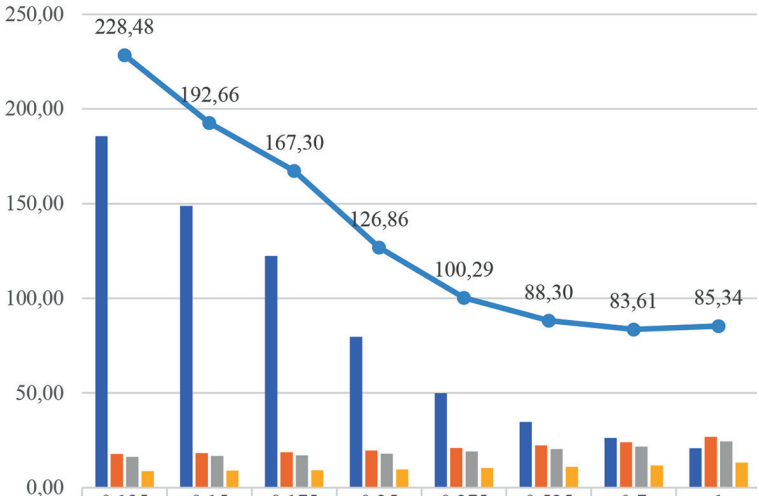
2. Все результаты расчетов параметров процессов фиксируются в таблицах [20], так как потребуются (когда будет установлено значение $d_{св}$, при котором достигнут минимум $\Sigma C_{уд} f(d_{св})$) в качестве оптимальных условий эксплуатации всего комплекса.

3. Затем устанавливаются затраты на выемочно-погрузочное оборудование, транспорт, бульдозерную технику и на процесс отвалообразования в целом. Также учитывается стоимость буровзрывных работ.

4. Строятся графики изменения удельных эксплуатационных затрат по процессам разработки пород III и IV категории при применении экскаваторов с вместимостью ковша 6,3÷55,8 м^3.

Таким образом, были получены графические зависимости изменения удельных эксплуатационных затрат по всем процессам разработки с помощью ЭАКМЛ с ковшами 6,3÷55,8 м^3.

Графики изменения суммарных удельных эксплуатационных затрат на разработку вскрыши с помощью ЭАКМЛ, построенные на основании установленной единой зависимости производительности мехлопат с ковшами 6,3÷55,8 м^3



	0,125	0,15	0,175	0,25	0,375	0,525	0,7	1
Удельные затраты на подготовку горных пород к выемке, руб/м3	185,60	148,72	122,43	79,65	49,95	34,67	26,19	20,84
Удельные затраты на выемочно-погрузочные работы, руб/м3	17,84	18,29	18,68	19,65	20,95	22,32	23,90	26,84
Удельные затраты на транспортирование, руб/м3	16,24	16,64	17,00	17,89	19,07	20,32	21,75	24,43
Удельные затраты на отвалообразование, руб/м3	8,79	9,01	9,20	9,68	10,32	11,00	11,77	13,22
Сумма удельных эксплуатационных затрат, ΣСуд, , руб/м3	228,48	192,66	167,30	126,86	100,29	88,30	83,61	85,34

Рис. 3. Изменение удельных эксплуатационных затрат по основным процессам разработки пород IV категории при применении мехлопаты ЭКГ-15

Fig. 3. Changes in specific operating costs for the main rock development processes of category IV when using the EKG-15 mechanical shovel

от средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы, имеют вид параболы. Зона ее минимальных значений определяет величину средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы, которая позволяет установить оптимальные параметры всех основных процессов и имеет тенденцию пропорционального увеличения с ростом вместимости ковша для принятых типов экскаваторов от 0,525 до 1,000 м.

На рис. 3 приведен пример изменения удельных эксплуатационных затрат всех процессов разработки IV категории при применении мехлопаты ЭКГ-15. Графическая зависимость показывает, что при разработке пород IV категории экскаватором ЭКГ-15 минимум удельных затрат достигается при средневзвешенном размере куска 0,7 м и составляет 83,61 руб./м^3. По значению средневзвешенного размера куска определяются все параметры основных процессов, обеспечивающие минимум затрат.

Область минимальных значений на графиках позволяет определить величину средневзвешенного размера кусков взорванной вскрышной породы, обеспечивающего оптимальные параметры всех основных процессов разработки: бурения, взрывания, экскавации, транспортирования и отвалообразования.

Таблица 3

Формулы для определения минимальных удельных эксплуатационных затрат по всем процессам в условиях разрезов Кузбасса и соответствующая им сменная производительность ЭАКМЛ

Formulas for determining the minimum specific operating costs for all processes in the Kuzbass quarries and the corresponding shift productivity of EACMS

Группа пород	Расчетные формулы	Критерии оценки достоверности		
		коэффициент корреляции	коэффициент детерминации	средняя ошибка аппроксимации
–	$Q_э = 433{,}23 \cdot E^{0{,}94}$, м³/ см	1,00	0,999	1,69%
III	$\Sigma C_{уд} = 304{,}87 \cdot E^{-0{,}46}$, руб. / м³	0,970	0,942	6,04%
IV	$\Sigma C_{уд} = 294{,}15 \cdot E^{-0{,}42}$, руб. / м³	0,964	0,929	6,13%

На основании полученных данных установлены значения минимальных удельных эксплуатационных затрат и сменной производительности механических лопат, которые представлены в табл. 2.

В табл. 3 представлены формулы для определения минимальных удельных эксплуатационных затрат по всем процессам в условиях разрезов Кузбасса и соответствующая им сменная производительность ЭАКМЛ.

Установленные эмпирические зависимости позволят принимать решения на стадии проектирования по типу и количеству мехлопат для конкретного горнодобывающего предприятия с учетом требуемых объемов добычи. На рис. 4

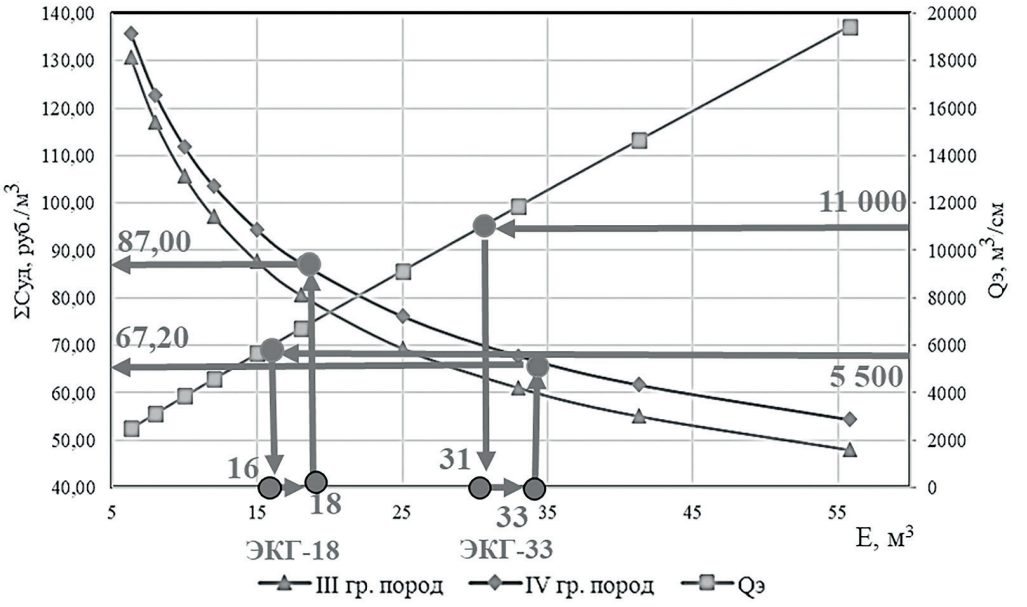


Рис. 4. Номограмма определения типа экскаваторов и количества ЭАКМЛ в условиях конкретного разреза в соответствии с требованиями по обеспечению плановой производительности

Fig. 4. Nomogram for determining the type of excavators and the number of EACMS in the conditions of a specific section in accordance with the requirements for ensuring planned productivity

представлена номограмма определения типа экскаваторов и количества ЭАКМЛ в условиях конкретного разреза в соответствии с требованиями по обеспечению плановой производительности.

Заключение

Предлагаемый способ оптимизации параметров ЭАКМЛ позволил определить параметры всех процессов технологии разработки пород с помощью ЭАКМЛ, оснащенных механическими лопатами с вместимостью ковша экскаватора от 6,3 до 55,8 м3, при разработке пород III и IV категории в условиях разрезов Кузбасса.

В работе по обоснованию оптимальных параметров технологических схем разработки вскрышных пород экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат для разрезов Кузбасса:

• установлена формула для расчета сменной эксплуатационной производительности мехлопат с учетом коэффициента экскавации, который включает значение средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы (1);

• выполнены опытно-промышленная проверка и сравнение результатов расчета производительности, полученной по предлагаемой формуле, с результатами производительности по известным методикам и с фактическими данными на разрезах. Значение коэффициента вариации составит 17,7% для производительности по предложенной формуле в сравнении с фактическими значениями;

• построена укрупненная блок-схема комплексного алгоритма оптимизации параметров ЭАКМЛ через выбор удельного расхода взрывчатых веществ, типа механической лопаты, автосамосвала, бурового станка и бульдозера;

• разработана методика оптимизации параметров ЭАКМЛ, в которой путем перебора удельного расхода взрывчатых веществ, типов механической лопаты, автосамосвалов, буровых станков и бульдозеров возможно обосновать параметры комплексов с применением мехлопат, обеспечивающие минимальные затраты на разработку вскрышных пород III и IV группы для разрезов Кузбасса;

• определены удельные эксплуатационные затраты по основным процессам технологии разработки пород с помощью ЭАКМЛ с вместимостью ковша 6,3÷55,8 м^3. Например, для экскаватора ЭКГ-15 минимум удельных затрат составляет 83,61 руб./м^3 при средневзвешенном диаметре куска 0,7 м.

• предложены эмпирические формулы для определения сменной производительности механических лопат $Q_э$ = = 433,23 · $E^{0,94}$, м^3/см и формулы для определения значений минимальных удельных эксплуатационных затрат для всех процессов для III группы пород — $\Sigma C_{уд}$ = 304,87 · $E^{-0,46}$, руб./м^3, и IV группы пород — $\Sigma C_{уд}$ = 294,15 · $E^{-0,42}$, руб./м^3;

• для оптимизации экскаваторов в ЭАКМЛ разработана номограмма, основанная на графических зависимостях минимальных удельных эксплуатационных затрат для всех процессов и сменной производительности механических лопат от вместимости ковша. Номограмма позволяет определять оптимальный тип и количество экскаваторов для достижения заданной производительности при разработке вскрышных пород III и IV категорий в условиях разрезов Кузбасса.

• результаты работы, поданные на конкурс «Лучший экспонат» в рамках XXXIII Международной специализированной выставки «Уголь России и майнинг», «Охрана, безопасность труда и жизнедеятельности», «Недра России», «Промтехэкспо» (3—6 июня 2025 г. в г. Новокузнецке) удостоены диплома и золотой медали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dindarioo S. R., Siami-Irdemoosa E., Frimpong S.* Measuring the effectiveness of mining shovels // Mining Engineering. 2016, vol. 68, no. 3, pp. 45—50. DOI: 10.19150/me.6501.

2. *Милый С. М.* Оценка технологий отработки крутонаклонных угольных месторождений Кузбасса // Техника и технология горного дела. — 2020. — № 1. — С. 45—73. DOI: 10.26730/2618-7434-2020-1-45-73.

3. *Kolesnikov V., Janočko J.* On the issue of classification of methods and schemes of quarry fields opening // Journal of Mining and Geotechnical Engineering. 2020, vol. 2, no. 9, pp. 42—74. DOI: 10.26730/2618-7434-2020-2-42-74.

4. *Özdogan M., Özdogan H.* Cycle time segments of electric rope shovels — a case study // Scientific Mining Journal. 2019, vol. 58, no. 1, pp. 73—79. DOI: 10.30797/madencilik.537648.

5. *Litvin O., Makarov V., Strelnikov A., Tyuleneva E.* Study of the backhoe's digging modes at rock face working-out // E3S Web of Conferences. 2019, vol. 105, article 01024. DOI: 10.1051/e3sconf/201910501024.

6. *Bumo-Motswaiso K., Suglo R. S.* Economic evaluation of materials handling systems in a deep open pit mine // International Journal of Mining and Mineral Engineering. 2022, vol. 13, no. 1, pp. 37—48. DOI: 10.1504/IJMME.2022.10048883.

7. *Bosikov I., Klyuev R., Tavasiev V., Gobeev M.* Influence of transport and road complex on the natural-technical system // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 918, no. 1, article 012223. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012223.

8. *Hödaverdi T., Akyildiz O.* Investigation of blast fragmentation models in a sandstone quarry // Scientific Mining Journal. 2020, vol. 59, no. 3, pp. 145—156. DOI: 10.30797/madencilik.792386.

9. *Чаплыгин В. В., Садыков А. А., Матвеев А. В.* К вопросу оптимизации параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород мехлопатами на разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 9. — С. 84—98. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_84.

10. *Бирюков А. В., Репин Н. Я., Паначев И. А., Ташкинов А. С.* Временная методика расчета параметров взрывной отбойки пород на угольных разрезах. — М.: Типография ИГД им. А.А. Скочинского, 1976. — 50 с.

11. *Репин Н. Я., Богатырев В. П., Буткин В. Д., Бирюков А. В., Звонов А. А.* Буровзрывные работы на угольных карьерах. — М.: Недра, 1987. — 254 с.

12. *Ташкинов А. С., Сысоев А. А., Ташкинов И. А.* Сравнительная оценка производительности карьерных экскаваторов при разработке взорванных пород // Вестник КузГТУ. — 2009. — № 4. — С. 17—20.

13. *Кононенко Е. А., Исайченков А. Б.* Влияние кусковатости взорванных пород на производительность экскаватора Bucyrus 495HD // Маркшейдерия и недропользование. — 2014. — № 6. — С. 17—19.

14. *Вилкул Ю. Г., Перегудов В. В.* Влияние гранулометрического состава взорванной горной массы на технико-экономические показатели работы карьеров // Криворожский технический университет. Разработка рудных месторождений. — 2011. — № 94. — С. 3—7.

15. *Казангапов А. Е., Куттыбаев А. Е., Саменов Г. К., Петрунько А. Н.* Зависимость производительности экскаватора от кусковатости взорванной породы на Житикаринском карьере // Вестник КазНТУ. — 2006. — № 2. — С. 153—156.

16. *Hai X., Funchun L., Jiangnan L., Taoying L.* Research on selection and matching of truck-shovel in oversized open-pit mines // Applied Sciences. 2023, no. 13, no. 6, pp. 1—11. DOI: 10.3390/app13063851.

17. *Федотенко В. С., Чаплыгин В. В., Матвеев А. В.* Оптимизация параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат // Маркшейдерия и недропользование. — 2024. — № 1(129). — С. 17—31. DOI: 10.56195/20793332_2024_1_17_31.

18. *Vysochyn I., Sytnyk H., Zhuk T., Mazur Yu., Shykova L., Gordeyeva Ye.* Information tools for enterprise management in Economics 4.0 // Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu. 2022, no. 3, pp. 141—145.

19. *Kovalchuk V. A., Kovalchuk T. M.* The economic-mathematical modeling of the optimal structure of investment of a mining and dressing enterprise // Business Inform. 2020, no. 2(505), pp. 108—114.

20. *Матвеев А. В.* Параметры технологии разработки полускальных пород экскаваторно-автомобильными комплексами для разрезов Кузбасса // Недропользование XXI век. — 2024. — № 2(103). — С. 88—93. ГИАБ

REFERENCES

1. Dindarioo S. R., Siami-Irdemoosa E., Frimpong S. Measuring the effectiveness of mining shovels. *Mining Engineering*. 2016, vol. 68, no. 3, pp. 45—50. DOI: 10.19150/me.6501.

2. Miliy S. M. Evaluation of technology for development of inclined and steep coal deposits in Kuzbass. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2020, no. 1, pp. 45—73. [In Russ]. DOI: 10.26730/2618-7434-2020-1-45-73.

3. Kolesnikov V., Janočko J. On the issue of classification of methods and schemes of quarry fields opening. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering*. 2020, vol. 2, no. 9, pp. 42—74. DOI: 10.26730/2618-7434-2020-2-42-74.

4. Özdogan M., Özdogan H. Cycle time segments of electric rope shovels — a case study. *Scientific Mining Journal*. 2019, vol. 58, no. 1, pp. 73—79. DOI: 10.30797/madencilik.537648.

5. Litvin O., Makarov V., Strelnikov A., Tyuleneva E. Study of the backhoe's digging modes at rock face working-out. *E3S Web of Conferences*. 2019, vol. 105, article 01024. DOI: 10.1051/e3sconf/201910501024.

6. Bumo-Motswaiso K., Suglo R. S. Economic evaluation of materials handling systems in a deep open pit mine. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*. 2022, vol. 13, no. 1, pp. 37—48. DOI: 10.1504/IJMME.2022.10048883.

7. Bosikov I., Klyuev R., Tavasiev V., Gobeev M. Influence of transport and road complex on the natural-technical system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 918, no. 1, article 012223. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012223.

8. Hödaverdi T., Akyildiz O. Investigation of blast fragmentation models in a sandstone quarry. *Scientific Mining Journal*. 2020, vol. 59, no. 3, pp. 145—156. DOI: 10.30797/madencilik.792386.

9. Chaplygin V. V., Sadykov A. A., Matveev A. V. Optimization of parameters of semi-hard overburden excavation by power shovels in open pit mines in Kuzbass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 9, pp. 84—98. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_84.

10. Biryukov A. V., Repin N. Ya., Panachev I. A., Tashkinov A. S. *Vremennaya metodika rascheta parametrov vzryvnoy otboyki porod na ugol'nykh razrezakh* [A temporary method for calculating the parameters of explosive rock breaking at coal mines], Moscow, 1976, 50 p.

11. Repin N. Ya., Bogatyrev V. P., Butkin V. D., Biryukov A. V., Zvonov A. A. *Burovzryvnye raboty na ugol'nykh kar'erakh* [Drilling and blasting operations at coal pits], Moscow, Nedra, 1987, 254 p.

12. Tashkinov A. S., Sysoev A. A., Tashkinov I. A. Comparative evaluation of the productivity of quarry excavators in the development of blasted rocks. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2009, no. 4, pp. 17—20. [In Russ].

13. Kononenko E. A., Isaychenkov A. B. The impact of the lumpiness of the blasted rocks on the performance of the Bucyrus 495HD excavator. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2014, no. 6, pp. 17—19. [In Russ].

14. Vilkul Yu. G., Peregudov V. V. The influence of the granulometric composition of the exploded rock mass on the technical and economic performance of quarries. *Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy*. 2011, no. 94, pp. 3—7. [In Russ].

15. Kazangapov A. E., Kuttybaev A. E., Samenov G., Petrun'ko A. N. Dependence of excavator performance on the lumpiness of the blasted rock at the Zhitikarinsky quarry. *Vestnik Kazakhskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta im. K.I. Satpaeva*. 2006, no. 2, pp. 153—156. [In Russ].

16. Hai X., Funchun L., Jiangnan L., Taoying L. Research on selection and matching of truck-shovel in oversized open-pit mines. *Applied Sciences*. 2023, no. 13, no. 6, pp. 1—11. DOI: 10.3390/app13063851.

17. Fedotenko V. S., Chaplygin V. V., Matveev A. V. Optimization of the parameters of the technology for the development of semi-horizontal overburden by excavator-automotive complexes using mechanical shovels. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2024, no. 1(129), pp. 17—31. [In Russ]. DOI: 10.56195/20793332_2024_1_17_31.

18. Vysochyn I., Sytnyk H., Zhuk T., Mazur Yu., Shykova L., Gordeyeva Ye. Information tools for enterprise management in Economics 4.0. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2022, no. 3, pp. 141 — 145.

19. Kovalchuk V. A., Kovalchuk T. M. The economic-mathematical modeling of the optimal structure of investment of a mining and dressing enterprise. *Business Inform*. 2020, no. 2(505), pp. 108 — 114.

20. Matveev A. V. Parameters of the technology for the development of semi-basement rocks by excavator-automobile complexes for Kuzbass sections. *Subsoil use of the XXI century. Nedropolzovanie — XXI vek*. 2024, no. 2(103), pp. 88 — 93. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чаплыгин Валерий Васильевич[1] — канд. техн. наук,
доцент, зав. кафедрой, e-mail: chaplygin_vv@sibsiu.ru,
ORCID ID: 0009-0001-2949-1929,
Садыков Артур Алексович[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: artur.aleksovich@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-9068-800X,
Матвеев Андрей Васильевич[1] — старший преподаватель,
e-mail: matveev_av@sibsiu.ru,
ORCID ID: 0009-0009-7376-1189,
[1] Сибирский государственный индустриальный университет.
Для контактов: Садыков А.А., e-mail: artur.aleksovich@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.V. Chaplygin[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor, Head of Chair,
e-mail: chaplygin_vv@sibsiu.ru,
ORCID ID: 0009-0001-2949-1929,
A.A. Sadykov[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: artur.aleksovich@gmail.com,
ORCID ID: 0000-0002-9068-800X,
A.V. Matveev[1], Senior Lecturer,
e-mail: matveev_av@sibsiu.ru,
ORCID ID: 0009-0009-7376-1189,
[1] Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, 654007, Russia.
Corresponding author: A.A. Sadykov, e-mail: artur.aleksovich@gmail.com.

Получена редакцией 07.05.2025; получена после рецензии 10.07.2025; принята к печати 10.12.2025.
Received by the editors 07.05.2025; received after the review 10.07.2025; accepted for printing 10.12.2025.