

# ПАРАМЕТРЫ ЭКСКАВАТОРНО-АВТОМОБИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХЛОПАТ ДЛЯ РАЗРЕЗОВ КУЗБАССА

А. В. Матвеев✉

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,

г. Новокузнецк, Российская Федерация

✉ matveev-av@yandex.ru

**Аннотация:** Представлены результаты исследований по обоснованию оптимальных параметров экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат (ЭАКМЛ) для условий разрезов Кузбасса.

В работе решен ряд задач: разработана единая формула для определения производительности современных мехлопат с вместимостью ковша 6,3 до 55,8 м<sup>3</sup> в зависимости от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород, высокая достоверность которой подтверждена при сравнении расчетных значений с хронометражными, полученных на разрезах в результате опытно-промышленной проверки; разработаны алгоритм и методика определения оптимальных параметров ЭАКМЛ; установлены графические зависимости изменения удельных эксплуатационных затрат на разработку одного кубометра вскрыши в условиях разрезов Кузбасса от величины средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы при применении мехлопат с вместимостью ковша 6,3 ÷ 55,8 м<sup>3</sup> для III и IV категории пород; разработан экспресс-метод – номограмма для выбора типа экскаватора или их количества при проектировании или планировании горных работ.

В статье приведены значения минимальных издержек и сменной производительности мехлопат при разработке вскрышных пород III и IV категории ЭАКМЛ с вместимостью ковша 6,3÷55,8 м<sup>3</sup> для условий разрезов Кузбасса, соответствующие оптимальным условиям ведения работ. Эти рекомендации и методический подход, представленный в работе, 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 для повышения экономической эффективности добычи угля.

**Ключевые слова:** экскаваторно-автомобильный комплекс, механическая лопата, угольный разрез, вскрышные породы, буровзрывные работы, блок-схема алгоритма, средневзвешенный размер куска взорванной породы, эксплуатационная производительность, удельные эксплуатационные затраты

**Благодарности:** Автор выражает признательность док-ру техн. наук В. С. Федотенко, канд. техн. наук В. В. Чаплыгину, зав. кафедрой ОГРиЭ СибГИУ канд. техн. наук А. А. Садыкову за помощь при выполнении исследований.

**Для цитирования:** Матвеев АВ. Параметры экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат для разрезов Кузбасса. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(4):31-40. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-31-40>.

# PARAMETERS OF EXCAVATOR-AUTOMOBILE COMPLEXES USING MECHANICAL SHOVELS FOR KUZBASS SECTIONS

A. V. Matveev✉

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation

✉ matveev-av@yandex.ru

**Abstract:** The article presents the results of studies to substantiate the optimal parameters of excavator-automobile complexes using mechanical shovels (EAKML) for the conditions of the Kuzbass sections.

A number of tasks have been solved in the work: a unified formula has been developed to determine the performance of modern mechanical shovels with a bucket capacity of 6,3 to 55,8 m<sup>3</sup> of the weighted average size of blasted rock pieces, the high reliability of which has been confirmed by comparing the calculated values with timing values obtained at the sections as a result of a pilot industrial inspection; an algorithm and methodology for determining the optimal parameters of EAKML was developed; graphical relationships were established between changes in the specific operating costs for the development of one cubic meter of overburden in the conditions of Kuzbass sections and the weighted average size of pieces of blasted rock when using mechlopat with a bucket

capacity of  $6,3 \div 55,8 \text{ m}^3$  for rock categories IV and III; an express nomogram method was developed to select the type of excavator or their number in the design or planning of mining operations.

The article presents the values of minimum costs and replacement productivity of mechanical shovels in the development of overburden rocks of categories III and IV of EAKML with a bucket capacity of  $6,3 \div 55,8 \text{ m}^3$  for the conditions of the Kuzbass sections corresponding to the optimal working conditions. These recommendations and the methodological approach presented in the work will be useful for both designers and planners of mining enterprises. The use of the results of the work will make it possible to determine the optimal parameters of excavator-automobile complexes using mechanical shovels when re-equipping a quarry to increase the economic efficiency of coal mining.

**Keywords:** excavator-automobile complex, mechanical shovel, coal mine, overburden rocks, drilling and blasting operations, algorithm flow chart, weighted average piece of blasted rock mass, operational productivity, specific operating costs

**Acknowledgements:** The author expresses his gratitude to Dr. Technical Sciences V. S. Fedotenko, Candidate of Technical Sciences V. V. Chaplygin, Head of the Department of OGRE SibGIU, Candidate of Technical Sciences A. A. Sadykov for assistance in carrying out research.

**For citation:** Matveev AV. Parameters of excavator-automobile complexes using mechanical shovels for Kuzbass sections. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(4):31-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-4-31-40>.

### Введение

Для выполнения вскрышных работ на разрезах Кузбасса широко применяются экскаваторно-автомобильные комплексы с использованием механических лопат (ЭАКМЛ) [1–3]. Более 80 % вскрышных пород разрабатывается с предварительным рыхлением буровзрывным способом и относятся к III и IV категориям по взрываемости.

Эффективность функционирования ЭАКМЛ существенно зависит от выбора параметров технологических процессов, начиная от подготовки горной массы к выемке и заканчивая укладкой породы в отвал [4].

Техническая характеристика применяемого оборудования ЭАКМЛ характеризуется довольно широким диапазоном параметров:

- механические лопаты оснащаются ковшами вместимостью от 6,3 до 55,8 м<sup>3</sup>,
- используются автосамосвалы грузоподъемностью от 55 до 360 тонн,
- диаметр буровых скважин варьируется от 170 до 270 мм,
- прием горной массы на отвалах и выполнение вспомогательных операций обеспечивается бульдозерной техникой различных модификаций.

Анализ результатов, выполненных ранее теоретических и экспериментальных работ по данной теме, показал, что решить задачу обоснования рациональных параметров ЭАКМЛ можно тогда, когда установлена зависимость изменения производительности механических лопат от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород [5–8].

Принимая во внимание указанные особенности работающего оборудования и специфику ведения горных работ, возникает объективная необходимость обоснования рациональных технологических решений применительно к условиям конкретного участка горных работ, а также в сравнительном анализе эффективности различных параметров процессов и типов оборудования всех звеньев технологической цепи.

Основным процессом исследуемой технологии является подготовка пород к выемке. Она характеризуется рядом параметров, такими как  $d_{\text{св}}$  – диаметр скважин,  $L_{\text{св}}$  – глубина скважин, сетка скважин ( $a$ ,  $b$ ,  $W$ ), и еще таким параметром, как  $q$  – удельным расходом взрывчатых веществ (ВВ), изменение которого определяет издержки по процессу подготов-

ки горных пород к выемке буровзрывным способом (БВР). Критерием оценки процесса БВР принято считать величину  $d_{\text{св}}$  – средневзвешенного размера кусков взорванных пород, который, как известно, характеризует производительность экскаватора, определяет величину коэффициента экскавации, а также время, затрачиваемое на набор ковша, эксплуатационную производительность экскаватора и величину затрат по процессу выемочно-погрузочных работ.

Эксплуатационная производительность  $Q_{\text{э}}$  экскаватора влияет на следующий производственный процесс – перемещение карьерных грузов. Чем больше объем горной массы в ковше, который за один цикл грузится экскаватором в автосамосвал, тем быстрее он загружается и, следовательно, необходимо больше автомобилей  $N_{\text{а}}$  для транспортировки на требуемое расстояние.

Производительность автотранспорта  $Q_{\text{а}}$ , рассчитанная исходя из грузоподъемности  $P$  и дальности транспортирования  $L_{\text{тр}}$  горной массы, определяет затраты на эксплуатацию автотранспорта  $C_{\text{тр}}$ .

Количество бульдозеров  $N_{\text{б}}$  и их тип определяет затраты на процесс отвалообразования  $C_{\text{б}}$ , зависит от эксплуатационной производительностью экскаватора и схемы организации работ.

Средневзвешенный размер кусков взорванной породы служит важным критерием эффективности всей технологической цепи, позволяя согласовать между собой параметры процессов технологии ведения горных работ ЭАКМЛ (рис. 1).

Величина средневзвешенного размера куска является основным фактором, позволяющим определять параметры технологии, а сопоставляя варианты – выбрать тот, который обеспечивает минимум суммарных затрат по процессам в конкретных условиях работы комплекса.

Таким образом, задаваясь величиной средневзвешенного размера куска взорванных пород  $d_{\text{св}}$ , определяются соответствующие параметры процессов технологии разработки пород ЭАКМЛ и суммарные удельные затраты на разработку для конкретных горнотехнических условий угольного разреза. В результате перебора различных значений  $d_{\text{св}}$  может быть выбрана его величина, соответствующая минимуму совокупных удельных эксплуатационных затрат, а параметры процессов в этих условиях работы комплекса можно считать оптимальными.

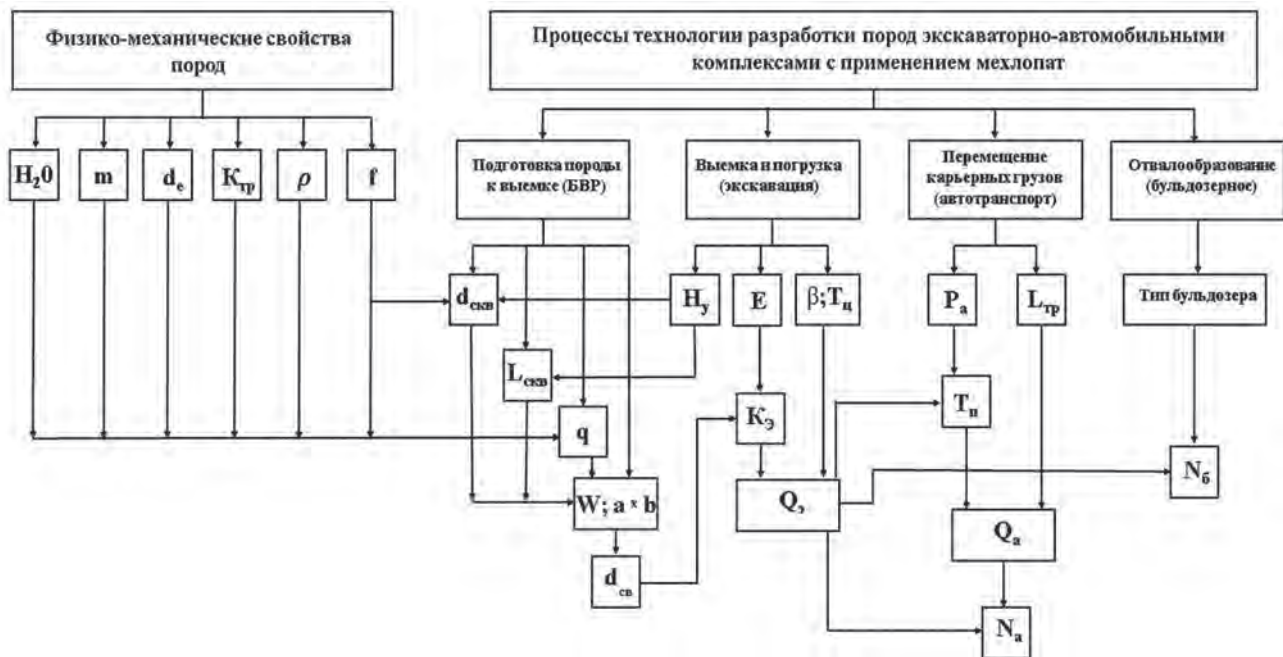


Рис. 1. Анализ влияния горнотехнических факторов на параметры процессов разработки вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами / Fig. 1. Analysis of the Impact of Mining Factors on the Parameters of Overburden Excavation Processes by Excavator and Automobile Complexes

Такой подход предполагает учет затрат всей технологической цепочки при разработке взорванных вскрышных пород современными экскаваторами – механической лопатой с последующим их транспортированием автосамосвалами и укладкой в бульдозерный отвал, что позволяет обеспечить минимизацию издержек для любых применяемых технических средств (оборудования) с учетом физико-механических свойств разрабатываемых пород при обеспечении безопасных условий эксплуатации.

Следовательно, главной целью исследований является разработка методики для расчета параметров работы экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат на разрезах Кузбасса, которая путем перебора различных значений  $d_{св}$  позволяет определить параметры процессов в этих условиях работы комплекса, установить минимальные значения суммарных удельных эксплуатационных затрат и выбрать те параметры, которые обеспечивают минимум издержек при разработке вскрышных пород III и IV категории в конкретных условиях разрезов Кузбасса.

#### Основные задачи и методы исследований

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- разработана единая формула для определения производительности современных мехлопат с вместимостью ковша 6,3 до 55,8 м³ в зависимости от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород, высокая достоверность которой подтверждена при сравнении расчетных значений с хронометражными, полученными на разрезах в результате опытно-промышленной проверки;
- разработаны алгоритм и методика определения оптимальных параметров ЭАКМЛ;
- установлены графические зависимости изменения удельных эксплуатационных затрат на разработку одного кубометра вскрыши в условиях разрезов Кузбасса от величины средневзвешенного размера кусков взорванной гор-

ной массы при применении мехлопат с вместимостью ковша 6,3 ÷ 55,8 м³ для III и IV категории пород;

– разработан экспресс метод – номограмма для выбора типа экскаватора или их количества при проектировании или планировании горных работ.

Принятая идея работы предполагает, что построением графической зависимости изменения суммарных удельных затрат на разработку полускальных вскрышных пород ЭАКМЛ от величины средневзвешенного размера кусков взорванной вскрышной породы, значения которого, соответствующие минимальным издержкам, определяют параметры каждого из процессов и производительность комплекса, совокупно обеспечивающие оптимальные параметры технологии. При этом совокупные издержки являются фактором, который определяет эффективность всего комплекса [9–10].

В таком случае целевую функцию математической модели для решения поставленной задачи оптимизации параметров ЭАКМЛ можно представить в виде

$$C_{бвр}f(d_{св}) + C_{э}f(d_{св}) + C_{м}f(d_{св}) + C_{о}f(d_{св}) = \sum C_{уд}f(d_{св}) \rightarrow \min, \text{ руб./м}^3, \quad (1)$$

где  $C_{бвр}f(d_{св})$ ;  $C_{э}f(d_{св})$ ;  $C_{м}f(d_{св})$ ;  $C_{о}f(d_{св})$  – удельные затраты соответственно на БВР, экскавацию, перемещение карьерных грузов и отвалообразование, руб/м³;

$\sum C_{уд}f(d_{св})$  – суммарные удельные затраты по всем основным процессам принятой технологии разработки, руб/м³.

Были проанализированы имеющиеся методики расчета производительности экскаваторов-мехлопат [11–17]. Установлено, что вид графических зависимостей изменения производительности механических лопат и коэффициента экскавации от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород для всех типов экскаваторов с ковшом вместимостью от 6,3 до 55,8 м³, рассчитанные по известным в настоящее время методикам, значительно отличаются друг

от друга. Из-за этого возникла необходимость поиска иных подходов для установления зависимости изменения расчета производительности экскаваторов-мехлопат от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород.

В этой связи представляют интерес исследования, одним из результатов которых является значение коэффициента экскавации  $K_3$  для скальных и полускальных разрыхленных пород при условии нормального (полного) заполнения ковша от соотношения диаметра среднего куска взорванной горной массы (по объему) и вместимости ковша экскаватора кубообразной формы [18].

На следующем этапе исследований были определены эмпирические формулы для расчета  $K_3$  для каждого типа современных мехлопат от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород и получена общая (единая) зависимость [3, 12]:

$$K_3 = \frac{0,220 \cdot E^{0,234}}{d_{св}^n}, \text{ где } n = \frac{0,234}{E^{0,220}} \quad (2)$$

Статистическая обработка результатов расчета по полученной эмпирической формуле (2) показала достаточно высокую достоверность расчета коэффициента экскавации, что подтверждает диапазон изменения величин:

- среднего линейного отклонения – 0,005–0,069;
- среднеквадратического отклонения – 0,032–0,096 %;
- коэффициента вариации 7,52–18,12 % при среднем значении 12,3 %.

Подставив эмпирическую формулу для расчета коэффициента экскавации от средневзвешенного размера кусков взорванных пород в зависимость для расчета производительности механических лопат, установленную в 1976 году Н. Я. Репиным и соавторами [5], получим универсальную (для экскаваторов-мехлопат с ковшом вместимостью от 6,3 до 55,8 м<sup>3</sup>) расчетную эмпирическую формулу для определения величины сменной эксплуатационной производительности от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород:

$$Q_{см} = \frac{3600 \cdot E \cdot T_{см} \cdot \frac{0,22 \cdot E^{0,234}}{d_{св}^{0,22}} \cdot K_3 \cdot K_{ис}}{67 d_{св}^2 + \frac{E}{0,11E + 0,6} + \sqrt{\frac{(35 \cdot E + 0,42 \cdot E^2)^{\frac{5}{3}} \cdot \beta_n^2}{E}} + t_p}, \text{ м}^3 / \text{см}, \quad (3)$$

где  $T_{см}$  – продолжительность смены, ч;  $K_3$  – коэффициент влияния параметров забоя;  $K_{ис}$  – коэффициент использования экскаватора в течение смены;  $t_p$  – время разгрузки, с.

С целью подтверждения достоверности расчета по предложенной эмпирической формуле и сопоставления полученных результатов с существующими зависимостями была проведена опытно-промышленная проверка, которая определила фактическую производительность мехлопат в условиях разрезов Кузбасса.

Методический подход к проведению опытно-промышленной проверки состоял из нескольких последовательно реализованных этапов:

- сбора исходных данных о горнотехнических условиях работы, принятых параметров технологических схем и процессов;
- проведения хронометражных наблюдений, необходимых для определения реального показателя эффективности

использования рабочего времени экскаваторами при отработке взорванных блоков (коэффициент использования календарного времени  $K_{кв}$ );

– расчета величины средневзвешенного размера куска взорванной горной массы с применением специализированного программного комплекса BlastMaker.

При проведении хронометража работы экскаваторов для каждого взрывного блока формировалась карта распределения рабочего времени. Основной задачей проведенных измерений стало выявление точного значения коэффициента использования календарного времени  $K_{кв}$  экскаватором.

Среднее значение коэффициента использования календарного времени при отработке блоков определялось следующим образом:

$$K_{кв} = \frac{[(V_1 K_{кв1}) + (V_2 K_{кв2}) + (V_3 K_{кв3})]}{V_1 + V_2 + V_3}, \text{ дол. ед.}, \quad (4)$$

где  $V_1, V_2, V_3$  – объемы взрываемого блока, м<sup>3</sup>;  $K_{кв1}, K_{кв2}, K_{кв3}$  – коэффициенты использования календарного времени при отработке блоков, дол. ед.

При этом сменная эксплуатационная производительность мехлопат определялась для каждого блока:

$$Q_{см1} = \frac{V_1}{T_{кал}} T_{см} K_{кв}, \text{ м}^3 / \text{см}, \quad (5)$$

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

Среднее значение сменной эксплуатационной производительности мехлопат учитывает объемы каждого блока:

$$Q_{см} = \frac{[(V_1 Q_{см1}) + (V_2 Q_{см2})]}{V_1 + V_2}, \text{ м}^3 / \text{см}, \quad (6)$$

где  $Q_{см1}, Q_{см2}$  – сменная эксплуатационная производительность мехлопат, м<sup>3</sup>/см.

Величина средневзвешенного размера куска взорванной горной массы для каждого взрывного блока рассчитывалась посредством специального программного обеспечения BlastMaker. В ходе работы в данную программу вносили информацию о физико-механических свойствах разрабатываемых пород конкретного участка производства работ: плотности, пористости, коэффициенте крепости по шкале профессора М. М. Протодяконова, коэффициенте трещиноватости, блочности взрываемых пород. А далее – фактические параметры проведенных буровзрывных работ (глубину и диаметр скважин, схему размещения зарядов, тип и массу применяемого взрывчатого материала, конструкции зарядов, способы инициирования) [19].

Программа BlastMaker позволяет моделировать процесс разрушения массива породы взрывом, определять гранулометрический состав и величину средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы.

В результате проведенной работы были получены значения эксплуатационной производительности экскаваторов по различным формулам для условий конкретного предприятия и проведено сравнение с фактическими данными, полученными на разрезе (табл. 1).

С целью оценки предложенного подхода для определения эксплуатационной производительности мехлопат

Результаты опытно-промышленной проверки эмпирических зависимостей /  
Results of Pilot Testing of Empirical Relationships

| Тип ЭКГ /<br>Excavator type                                    | $d_{cp}, м$ | Факт<br>$Q_{э}, м^3/см$ | По формуле Н. Я. Репина и др. / According<br>to the formula N. Ya. Repin et al. |                                |                |                                               | По формуле А. А. Сысоева и др. /<br>According to the formula Sysoeva A.<br>A. et al. |                                |                |                                               | По новой предлагаемой<br>универсальной формуле<br>/ According to the new proposed<br>universal formula |                                |                |                                               |
|----------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|----------------|-----------------------------------------------|
|                                                                |             |                         | $Q_{э}, м^3/см$                                                                 | Ошибка<br>опыта,<br>$\Delta y$ | $ \Delta y^2 $ | Относит.<br>ошибка,<br>$\Delta y / y_{ф}, \%$ | $Q_{э}, м^3/см$                                                                      | Ошибка<br>опыта,<br>$\Delta y$ | $ \Delta y^2 $ | Относит.<br>ошибка,<br>$\Delta y / y_{ф}, \%$ | $Q_{э}, м^3/см$                                                                                        | Ошибка<br>опыта,<br>$\Delta y$ | $ \Delta y^2 $ | Относит.<br>ошибка,<br>$\Delta y / y_{ф}, \%$ |
| ЭКГ-6,3                                                        | 0,76        | 1752                    | 3111                                                                            | 1359                           | 1847532        | 77,6                                          | 3802                                                                                 | 2050                           | 4201184        | 117                                           | 2068                                                                                                   | 316                            | 100070         | 18,1                                          |
| ЭКГ-8                                                          | 0,78        | 2520                    | 4200                                                                            | 1680                           | 2823664        | 66,7                                          | 4608                                                                                 | 2088                           | 4360119        | 82,9                                          | 2716                                                                                                   | 196                            | 38250          | 7,8                                           |
| ЭКГ-10                                                         | 0,79        | 2688                    | 5538                                                                            | 2850                           | 8123644        | 106                                           | 5606                                                                                 | 2918                           | 8512316        | 108,5                                         | 3494                                                                                                   | 806                            | 649060         | 30                                            |
| ЭКГ-12                                                         | 0,81        | 3348                    | 6737                                                                            | 3389                           | 11487427       | 101,2                                         | 6327                                                                                 | 2979                           | 8874514        | 89                                            | 4246                                                                                                   | 898                            | 806027         | 26,8                                          |
| ЭКГ-15                                                         | 0,83        | 4572                    | 8530                                                                            | 3958                           | 15662158       | 86,6                                          | 7385                                                                                 | 2813                           | 7913485        | 61,5                                          | 5378                                                                                                   | 806                            | 650133         | 17,6                                          |
| ЭКГ-18                                                         | 0,85        | 4716                    | 10222                                                                           | 5506                           | 30313349       | 116,7                                         | 8246                                                                                 | 3530                           | 12457477       | 74,8                                          | 6494                                                                                                   | 1778                           | 3159712        | 37,7                                          |
| ЭКГ-25                                                         | 0,87        | 9960                    | 14130                                                                           | 4170                           | 17388823       | 41,9                                          | 10460                                                                                | 500                            | 250462         | 5                                             | 9092                                                                                                   | -868                           | 754000         | -8,7                                          |
| РН-2800ХРС<br>(33 м³)                                          | 0,89        | 14004                   | 18198                                                                           | 4194                           | 17587146       | 29,9                                          | 12544                                                                                | -1460                          | 2132480        | -10,4                                         | 11963                                                                                                  | -2041                          | 4163755        | -14,6                                         |
| WK-45 (41,3 м³)                                                | 0,9         | 16512                   | 22148                                                                           | 5636                           | 31769389       | 34,1                                          | 14716                                                                                | -1796                          | 3226180        | -10,9                                         | 14857                                                                                                  | -1655                          | 2740677        | -10                                           |
| РН-4100ХРС<br>(55,8 м³)                                        | 0,92        | 21888                   | 28260                                                                           | 6372                           | 40607220       | 29,1                                          | 17670                                                                                | -4218                          | 17788282       | -19,3                                         | 19641                                                                                                  | -2247                          | 5051069        | -10,3                                         |
| Среднее<br>арифметическое<br>по форм. у                        |             |                         | 12107                                                                           |                                | 177610352      |                                               | 9136                                                                                 |                                | 69716499       |                                               | 7995                                                                                                   |                                | 18112754       |                                               |
| Среднее<br>линейное<br>отклонение<br>( $\Sigma \Delta y / n$ ) |             |                         |                                                                                 | 3911                           |                |                                               |                                                                                      | 940                            |                |                                               |                                                                                                        | -201                           |                |                                               |
| Средне-<br>квадратическое<br>отклонение                        |             |                         | 4442                                                                            |                                |                |                                               | 2783                                                                                 |                                |                |                                               | 1419                                                                                                   |                                |                |                                               |
| Коэффициент<br>вариации, %                                     |             |                         |                                                                                 |                                | 36,7           |                                               |                                                                                      |                                | 30,5           |                                               |                                                                                                        |                                | 17,7           |                                               |

и сравнения полученных результатов с существующими методиками был проведен анализ отклонений расчетных значений от фактических данных, полученных в производственных условиях угольных разрезов Кузбасса. Для количественной оценки указанных различий был использован статистический показатель – коэффициент вариации. Коэффициент вариации для значений производительности мехлопат по методике Н. Я. Репина и других и фактическими значениями производительности составляет 36,7 %, коэффициент вариации для значений производительности по методике А. А. Сысоева и других [6] составляет 30,5 %, коэффициент вариации для значений производительности по методике Ю. Г. Вилкула и В. В. Перегудова [8] составляет 35,2 %, коэффициент вариации для значений производительности по предложенной формуле составляет – 17,7 %.

#### Результаты исследований

Эмпирическая формула для определения величины сменной эксплуатационной производительности механических лопат от средневзвешенного размера кусков взорванных пород (3) является основой разработанной методики, которая позволяет решать следующие задачи при оптимизации параметров ЭАКМЛ:

- выбор величины удельного расхода ВВ в определенных условиях работы;
- выбор типа мехлопаты путем сравнения их технико-э-

кономических показателей по величине суммарных удельных затрат экскаваторно-автомобильного комплекса;

- выбор технических средств (бурового станка, автосамосвала и бульдозера) различной производительности и стоимости;

- комплексную задачу путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа мехлопаты, автосамосвала, бурового станка и бульдозера.

Угруппенная блок-схема комплексного алгоритма оптимизации параметров ЭАКМЛ путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа мехлопаты, автосамосвалов, бурового станка и бульдозера представлена на рисунке 2.

В качестве методологической основы для оптимизации параметров ЭАКМЛ принят критерий минимизации – суммарные удельные эксплуатационные затраты на разработку вскрышных пород, учитывающих затраты, связанные с реализацией каждого из основных технологических процессов: подготовку горной массы к выемке, выемочно-погрузочные работы, транспортирование и отвалообразование.

Экономические показатели и использование информационных продуктов занимают важную часть в работе горнодобывающего предприятия [19, 21]. Фактические издержки на разработку вскрышных пород с применением ЭАКМЛ складываются из затрат по основным процессам технологии исследуемой технологии [22].

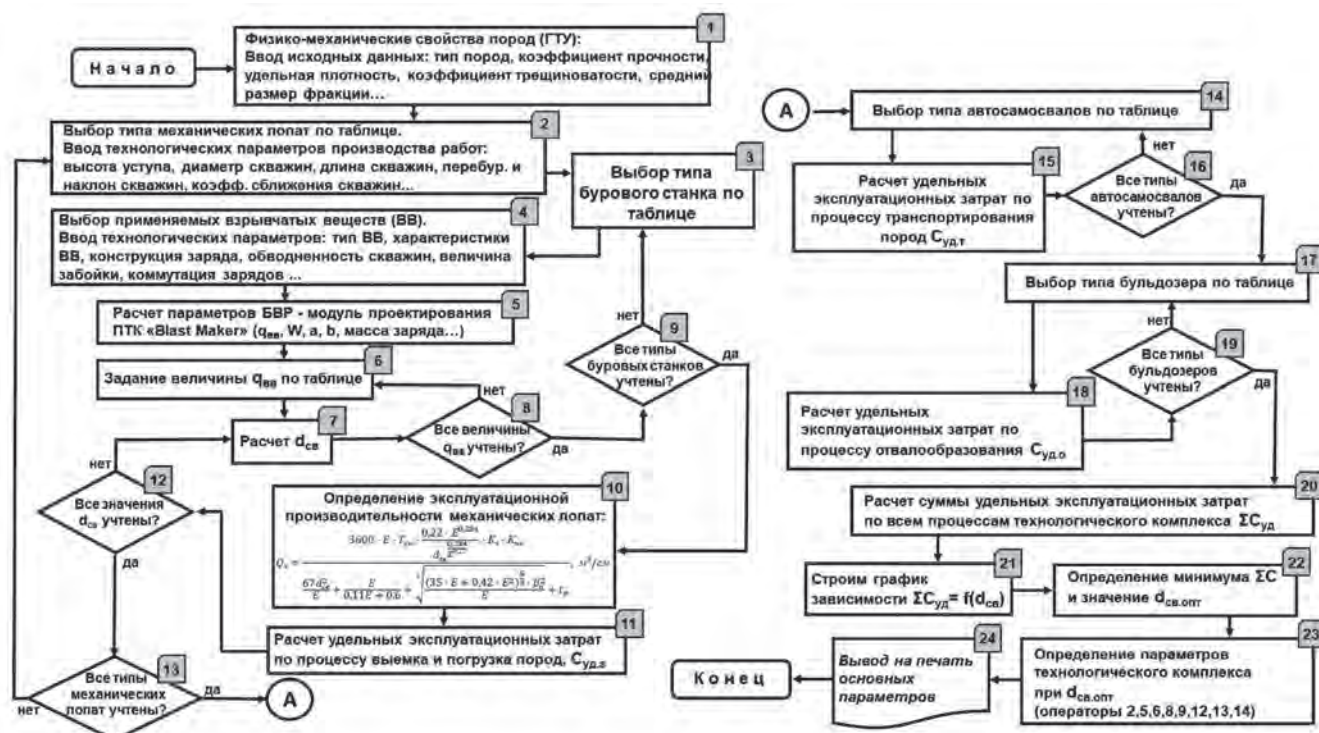


Рис. 2. Укрупненная блок-схема комплексного алгоритма оптимизации параметров экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат через выбор удельного расхода взрывчатых веществ, типа механической лопаты, автосамосвала, бурового станка и бульдозера /  
Fig. 2. Enlarged block diagram of a complex algorithm for optimizing the parameters of EAKML through the selection of the specific consumption of explosives, such as a mechanical shovel, dump truck, drilling rig and bulldozer

Формирование альтернативных вариантов работы ЭАКМЛ осуществлялось путем перебора значений критерия  $d_{св}$ , величина которого позволяет определить параметры всех основных процессов технологии разработки пород экскаваторно-автомобильным комплексом, сравнивать различные варианты состава оборудования комплекса, рассчитать суммарные эксплуатационные издержки, определить зону наименьших издержек и по величине  $d_{св}$  принять оптимальные параметры всех процессов.

Для определения минимума функции  $\Sigma C_{уд} = f(d_{св})$  в работе были приняты восемь значений величины  $d_{св}$  диапазоне от 0,125 до 1,000 м. При определении удельных затрат устанавливаются все основные параметры для каждого из принятых альтернативных вариантов, результаты фиксируются, а затем рассчитываются затраты на производство буровзрывных работ, работу выемочно-погрузочного оборудования, транспортирование и отвалообразование.

В результате были построены графики изменения суммарных удельных эксплуатационных затрат при разработке вскрышных пород III и IV категории экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат при вместимости ковша экскаватора от 6,3 до 55,8 м<sup>3</sup> в зависимости от средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы, имеющие вид параболы. Зона ее минимальных значений определяет величину средневзвешенного размера кусков взорванной горной массы, величина которого 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 рисунке 3 в качестве примера приведена графическая зависимость изменения суммарных удельных эксплуата-

ционных затрат всех процессов разработки пород IV категории ЭАКМЛ 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<sup>3</sup>. По значению средневзвешенного размера куска определяются все параметры основных процессов, обеспечивающие минимум затрат.

На основании полученных данных были рассчитаны минимальные удельные затраты на эксплуатацию и максимальная производительность механических лопат за смену, соответствующие оптимальным условиям ведения работ. Данные показатели представлены в таблице 2 и фактически являются ориентиром для реализации повышения экономической эффективности горнодобывающего предприятия путем снижения затрат при добыче полезных ископаемых.

Таким образом, анализируя графические зависимости изменения суммарных удельных затрат на разработку вскрышных пород III и IV категории экскаваторами-мехлопатами с вместимостью ковша от 6,3 до 55,8 м<sup>3</sup>, можно сказать, что они имеют квадратичную зависимость от средневзвешенного размера кусков взорванных пород, при этом по мере увеличения вместимости ковша экскаватора в принятом диапазоне минимум затрат смещается в сторону увеличения значения величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород от 0,525 до 1,000 м.

На основании данных, приведенных в таблице 2, методом степенной регрессии установлены формулы для определения минимальных удельных эксплуатационных затрат по всем процессам и сменной производительности механических лопат, которые представлены в таблице 3.

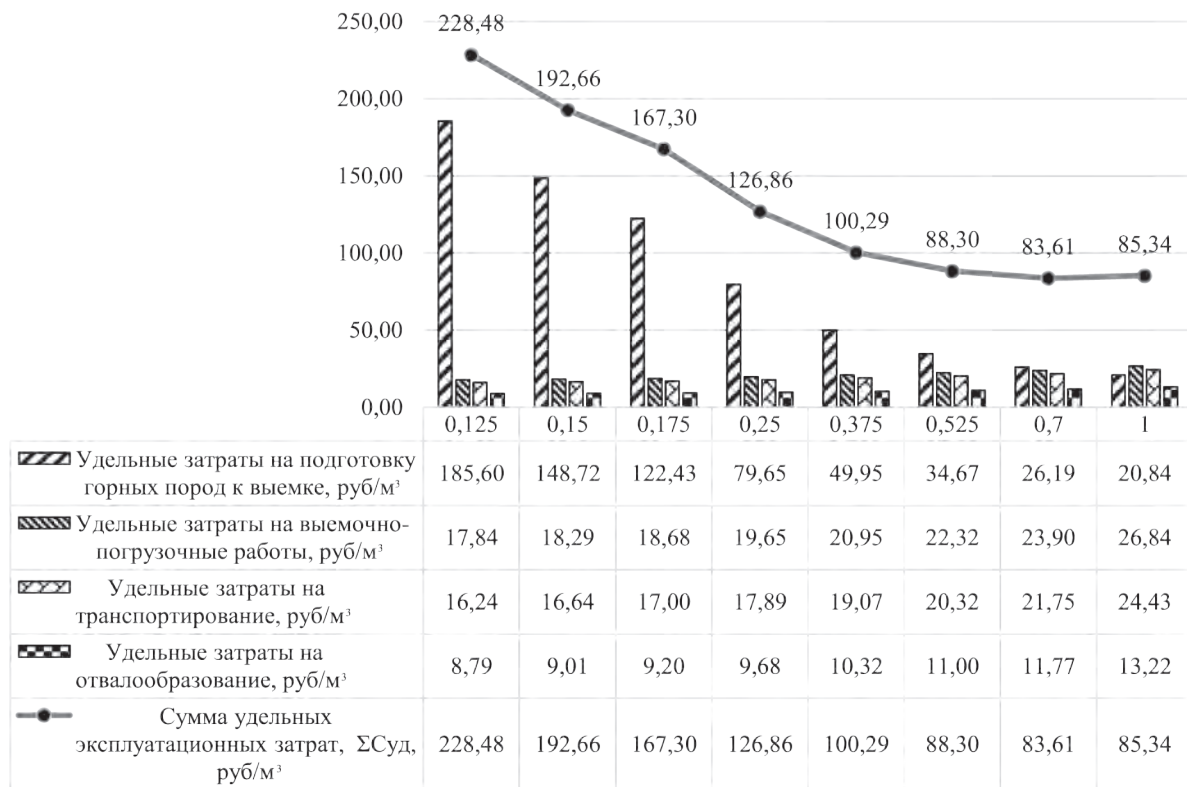


Рис. 3. Изменение удельных эксплуатационных затрат по основным процессам разработки пород IV категории при применении мехлопаты ЭКГ-15 /  
Fig. 3. Change in specific operating costs for the main development processes of category IV rocks with the use of mechanical shovels EKG-15

Таблица 2 / Table 2

Минимальные удельные эксплуатационные затраты и сменная производительность механических лопат /  
Minimum unit operating costs and replacement capacity of mechanical shovels

| Гр. пород / Group of breeds | Параметр / Parameter      | Экскаватор-мехлопата / Excavator mechanical shovel |        |        |        |        |        |        |        |          |          |
|-----------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|
|                             |                           | ЭКГ-6,3                                            | ЭКГ-8  | ЭКГ-10 | ЭКГ-12 | ЭКГ-15 | ЭКГ-18 | ЭКГ-25 | ЭКГ-33 | ЭКГ-41,3 | ЭКГ-55,8 |
| III                         | $d_{cp}$ , м              | 0,525                                              | 0,525  | 0,525  | 0,700  | 0,700  | 1,000  | 1,000  | 1,000  | 1,000    | 1,000    |
|                             | $Q_s$ , м³/см             | 2461                                               | 3177   | 4009   | 4463   | 5654   | 6173   | 8786   | 11683  | 14584    | 19402    |
|                             | $Q_{з год}$ , тыс. м³/год | 1531                                               | 1976   | 2494   | 2776   | 3517   | 3839   | 5465   | 7267   | 9071     | 12068    |
|                             | $\Sigma C_{уд}$ , руб/м³  | 132,99                                             | 131,62 | 104,51 | 90,77  | 78,42  | 75,67  | 73,14  | 69,33  | 55,00    | 46,60    |
| IV                          | $d_{cp}$ , м              | 0,525                                              | 0,525  | 0,700  | 0,700  | 0,700  | 0,700  | 1,000  | 1,000  | 1,000    | 1,000    |
|                             | $Q_s$ , м³/см             | 2461                                               | 3177   | 3662   | 4463   | 5654   | 6829   | 8786   | 11683  | 14584    | 19402    |
|                             | $Q_{з год}$ , 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    |

Таблица 3 / Table 3

Формулы для определения минимальных удельных эксплуатационных затрат по всем процессам и сменной производительности механических лопат /  
Formulas for determining minimum unit operating costs for all processes and replacement productivity of mechanical shovels

| Гр. пород / Group of breeds | Расчетные формулы / Calculation formulas          | Критерии оценки достоверности / Criteria for assessing reliability |                          |                              |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------|
|                             |                                                   | Коэффициент корреляции                                             | Коэффициент детерминации | Средняя ошибка аппроксимации |
| -                           | $Q_s = 433,23 \cdot E^{0,94}$ , 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 %                       |

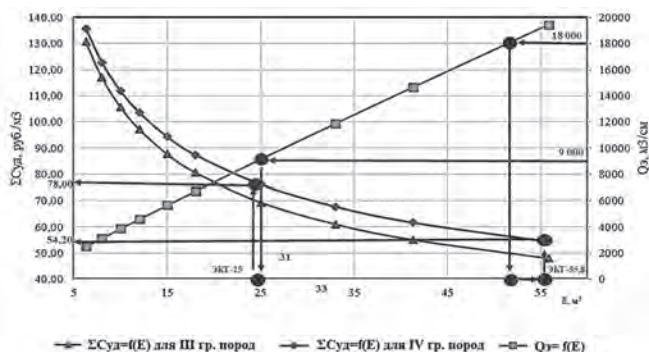
#### Обсуждение результатов исследований, предложения по практическому применению

Разработанные эмпирические зависимости предоставляют возможность выбирать оптимальные типы и количество мехлопат на этапе проектных разработок для любого горно-

добывающего предприятия, учитывая планируемые объемы работ.

Номограмма, представленная на рисунке 4, позволяет оперативно осуществить выбор подходящего типа экскаваторов или сравнить варианты оснащения ЭАКМЛ для обе-

спечения требуемой производительности в заданных геолого-технических условиях конкретного разреза. Требуемую производительность 18 тыс. м<sup>3</sup>/см можно обеспечить одним или двумя экскаваторами. Стрелками показаны необходимые действия при разработке взорванной горной массы IV категории. При применении ЭКГ-55,8 затраты  $\Sigma C_{уд} = 54,20$  руб/м<sup>3</sup>, при двух ЭКГ-25  $\Sigma C_{уд} = 78,00 \times 2 = 156,00$  руб/м<sup>3</sup>.



**Рис. 4. Номограмма определения типа экскаваторов и количества экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат 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 EAKML in a specific section in accordance with the requirements for ensuring planned productivity**

При реализации в условиях Краснобродского угольного разреза рекомендованных в работе параметров технологии работы ЭАКМЛ с экскаватором ЭКГ-12 обеспечивается сокращение удельных эксплуатационных затрат на 1,54 руб/м<sup>3</sup>, что при годовой производительности комплекса 2 776 тыс. м<sup>3</sup>/год дает экономический эффект 4 275 тыс. руб/год.

Результаты проведенных исследований, представленные на конкурс «Лучший экспонат» XXXIII Международной специализированной выставки «Уголь России и майнинг», «Охрана, безопасности труда и жизнедеятельности», «Недра России», «Промтехэкспо», проходившей 3–6 июня 2025 года в г. Новокузнецке, были удостоены диплома и золотой медали.

### Заключение

1. С помощью значений коэффициентов экскавации для скальных и полускальных разрыхленных пород при условии нормального (полного) заполнения ковша в зависимости от соотношения диаметра среднего куска взорванной горной массы (по объему) и вместимости ковша экскаватора кубообразной формы для каждого типа современных мехлопат с вместимостью ковша экскаватора от 6,3 до 55,8 м<sup>3</sup> определены численные значения  $K_0 = f(d_{св})$  (таблица 1), на основании которых была установлена эмпирическая формула зависимости  $Q_0 = f(d_{св})$  (3). Эта зависимость позволила установить изменение величины сменной эксплуатационной производительности механических лопат от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород для всех типов современных механических лопат.

2. Для проверки достоверности зависимости изменения величины сменной эксплуатационной производительности механических лопат от средневзвешенного размера кусков взорванных пород для всех типов современных механических лопат с результатами, достигнутыми на разрезах Кузбасса, проведена опытно-промышленная проверка.

Статистическая оценка зависимости изменения производительности экскаватора от средневзвешенного размера кусков взорванных пород с полученными результатами на разрезах Кузбасса показала достаточно высокую достоверность результата – коэффициент вариации составил 17,7 %.

3. Разработана методика оптимизации параметров ЭАКМЛ, основанная на построении графических зависимостей изменения суммарных удельных эксплуатационных затрат на разработку вскрыши в зависимости от средневзвешенного размера кусков взорванных пород  $d_{св}$ , позволяет определить зону их минимальных значений, а по величине  $d_{св}$  – параметры всех процессов, которые обеспечивают оптимальный режим работы с учетом физико-механических свойств разрабатываемых пород и организации работы комплекса. Методика позволяет произвести выбор величины удельного расхода ВВ, типа мехлопаты, автосамосвала, бурового станка и бульдозера.

4. В соответствии с требованиями разработанного методического подхода к оптимизации параметров ЭАКМЛ для всех принятых мехлопат с вместимостью ковша экскаватора от 6,3 до 55,8 м<sup>3</sup> в диапазоне изменения кусковатости взорванных пород от 0,125 до 1,000 м приняты восемь альтернативных вариантов величины средневзвешенного размера кусков  $d_{св}$ . Для каждого значения  $d_{св}$  были определены основные параметры процессов и затраты по ним. Все результаты расчетов параметров процессов, затрат по каждому из них и суммарные издержки фиксировались в таблицах, чтобы при установлении значения  $d_{св}$ , при котором достигнут минимум  $\Sigma C_{уд} f(d_{св})$ , принять эти параметры в качестве оптимальных для эксплуатации всего комплекса.

Суммарные удельные затраты на разработку вскрыши экскаваторами-мехлопатами с вместимостью ковша от 6,3 до 55,8 м<sup>3</sup> имеют квадратичную зависимость от средневзвешенного размера кусков взорванных пород, при этом по мере увеличения вместимости ковша экскаватора в указанном диапазоне минимум затрат соответствует величине средневзвешенного размера кусков взорванных пород от 0,525 до 1,000 м.

5. Построены графики изменения удельных эксплуатационных затрат по процессам разработки пород III и IV категории. Установлены значения  $d_{св}$ , при которых достигнут минимум суммарных удельных эксплуатационных затрат  $\Sigma C_{уд} f(d_{св})$ . Произведена выборка основных параметров процессов, установлена производительность ЭАКМЛ и затраты по ним для значений  $d_{св}$ , при котором достигнут минимум  $\Sigma C_{уд} f(d_{св})$ .

6. Значения минимальных издержек и сменной производительности мехлопат при разработке вскрышных пород III и IV категории ЭАКМЛ в условиях разрезов Кузбасса приведены в таблице 2. В результате применения метода степенной регрессии для аппроксимации функций на основании данных таблицы 2 установлены и представлены в таблице 3 эмпирические расчетные формулы для определения минимальных суммарных издержек по основным процессам и соответствующая им сменная производительность, зависящая от величины вместимости ковша. Эти зависимости позволяют техническим службам разрезов и проектировщикам оперативно на стадии принятия решения с достаточной точностью определять состав ЭАКМЛ для конкретных условий разреза в соответствии с установленными требованиями по обеспечению плановой добычи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ненашев АС, Федотенко ВС, Федотенко НА Развитие и состояние применяемых видов технологии ведения горных работ и систем разработки на разрезах Кузбасса. *Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2023; 3: 249-268. [Nenashev AS, Fedotenko VS, Fedotenko NA. The development and state of the applied types of mining technology and mining systems in the Kuzbass sections. *Proceedings of Tula State University. Earth Sciences*. 2023; 3: 249-268. (In Russ.)].
2. Ненашев АС, Федотенко ВС. Организационные условия высокопроизводительной работы мощных экскаваторно-автотранспортных комплексов на разрезах. *Маркшейдерия и недропользование*. 2019; 6 (104): 49-52. [Nenashev AS, Fedotenko VS. Organizational conditions of high-performance operation of powerful excavator-motor transport complexes in sections. *Surveying and subsoil use*. 2019; 6 (104): 49-52. (In Russ.)].
3. Чаплыгин ВВ, Садыков АА, Матвеев АВ. К вопросу оптимизации параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород на разрезах Кузбасса. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023; 9: 84-98. [Chaplygin VV, Sadykov AA, Matveev AV. On the issue of optimizing the parameters of the technology for the development of semi-horizontal overburden rocks in the Kuzbass sections. *Mining information and analytical bulletin*. 2023; 9: 84-98. (In Russ.)].
4. Сермин ДС, Матвеев АВ, Лобанова ОО. Анализ качества взорванных горных пород на основе интегрального распределения энергии. *Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: сб. трудов конф.* Новокузнецк, 2020: 210-212. [Sermin DS, Matveev AV, Lobanova OO. Analysis of the quality of blasted rocks based on the integral energy distribution. Science and youth: problems, searches, solutions: proceedings of the conference. Novokuzneck, 2020: 210-212. (In Russ.)].
5. Бирюков АВ, Репин НЯ, Паначев ИА и др. Временная методика расчета параметров взрывной отбойки пород на угольных разрезах. Москва, 1976: 50. [Birjukov AV, Repin NYa, Panachev IA, et al. A temporary method for calculating the parameters of explosive rock stripping at coal mines. Moscow, 1976: 50 (In Russ.)].
6. Ташкинов АС, Сысоев АА, Ташкинов ИА. Сравнительная оценка производительности карьерных экскаваторов при разработке взорванных пород. *Вестник КузГТУ*. 2009; 4: 17-20. [Tashkinov AS, Sysoev AA, Tashkinov IA. Comparative evaluation of the productivity of quarry excavators in the development of blasted rocks. *Bulletin of KuzSTU*. 2009; 4: 17-20. (In Russ.)].
7. Кононенко ЕА, Исайченков АБ. Влияния кусковатости взорванных пород на производительность экскаватора Bucyrus 495HD. *Маркшейдерия и недропользование*. 2014; 6: 17-19. [Kononenko EA, Isajchenkov AB. The impact of the lumpiness of blasted rocks on the performance of the Bucyrus 495HD excavator. *Surveying and subsoil use*. 2014; 6: 17-19. (In Russ.)].
8. Вилкул ЮГ, Перегудов ВВ. Влияние гранулометрического состава взорванной горной массы на технико-экономические показатели работы карьеров. *Криворожский технический университет, разработка рудных месторождений*. 2011; 94: 3-7. [Vilkul JuG, Peregudov VV. The influence of the granulometric composition of the exploded rock mass on the technical and economic performance of quarries. *Krivoy Rog Technical University, development of ore deposits*. 2011; 94: 3-7. (In Russ.)].
9. Кузнецов АГ. Оптимизация стратегического планирования развития уранодобывающей отрасли на основе экономико-математического моделирования. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2011; 4: 39-45. [Kuznecov AG. Optimization of strategic planning for the development of the uranium mining industry based on economic and mathematical modeling. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*. 2011; 4: 39-45. (In Russ.)].
10. Гилярова АА. Концепция объектно-ориентированной бизнес-модели инвестиционного горнорудного проекта. *Экономика и бизнес: теория и практика*. 2019; 10-1 (56): 88-92. [Giljarova AA. The concept of an object-oriented business model of an investment mining project. *Economics and Business: theory and practice*. 2019; 10-1 (56): 88-92. (In Russ.)].
11. Казангапов АЕ, Куттыбаев А Е, Саменов Г и др. Зависимость производительности экскаватора от кусковатости взорванной породы на Житикаринском карьере. *Вестник КазНТУ*. 2006; 2: 153-156. [Kazangapov AE, Kutybaev AE, Samenov G, et al. Dependence of excavator performance on the lumpiness of the blasted rock at the Zhitikarinsky quarry. *Bulletin of KazNTU*. 2006; 2: 153-156. (In Russ.)].
12. Федотенко ВС, Чаплыгин ВВ, Матвеев АВ. Оптимизация параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат. *Маркшейдерия и недропользование*. 2024; 1: 17-31. [Fedotenko VS, Chaplygin VV, Matveev AV. Optimization of the parameters of the technology for the development of semi-horizontal overburden by excavator-automotive complexes using mechlopat. *Mine Surveying and subsoil use*. 2024; 1: 17-31. (In Russ.)].
13. Артяева МА. Стоимостной подход при управлении увеличения ценности компании. *Инновации в науке: пути развития: мат-лы X Всерос. науч.-практ. конф., 26 дек. 2018 г.* Чебоксары, 2018: 203-205. [Artyaeva MA. A cost-based approach to managing increasing the value of a company. *Innovations in science: ways of development: mat-ly X All-Russian Scientific and Practical conference. December 26<sup>th</sup>. 2018*. Cheboksary, 2018: 203-205. (In Russ.)].
14. Kovalchuk VA, Kovalchuk TM. The economic-mathematical modeling of the optimal structure of investment of a mining and dressing enterprise. *Business Inform*. 2020; 2 (505): 104-108.
15. Vysochyn I, Sytnyk H, Zhuk, et al. Information for enterprise management in Economics 4.0. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2022; 3: 141-145.
16. Galkina NV, Kravchuk IL, Solin AV et al. An approach to the economic assessment of production risk at a mining enterprise. *News of the Ural state mining university*. 2022; 4: 151-158.
17. Wang, X. Construction of economic management performance model of mining enterprises under the background of supply-side reform. *Wseas transactions on business and economics*. 2023; 20: 2066-2076.
18. Ржевская СВ. Исследование разрыхляемости скальных и полускальных пород: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 1979: 17. [Rzhevskaya SV. Study of loosening of rocky and semi-rocky rocks: author's abstract. diss. ... st. candidate of technical sciences. Moscow, 1979: 17. (In Russ.)].
19. Trushina GS. Mining enterprise performance strategy economic evaluation. *Ugol*. 2017; 3: 52-55.
20. Бусырев ВМ. Экономические основы рационального освоения минерально-сырьевых ресурсов недр. *Вестник Кольского научного центра РАН*. 2019; 2: 75-82. [Busyrev VM. The economic foundations of the rational development of mineral resources of the subsoil. *Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019; 2: 75-82. (In Russ.)].
21. Временные нормы технологического проектирования угольных и сланцевых разрезов ВНТП 2-92. Москва, 1993: 78. [Temporary norms of technological design of coal and shale sections of VNTP 2-92. Moscow, 1993: 78. (In Russ.)].
22. Кузнецов АГ, Кузнецова ЮА. Применение ускоренной амортизации для повышения эффективности инвестиционных проектов в горной промышленности. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2011; 1: 33-35. [Kuznecov AG, Kuznecova JuA. The use

of accelerated depreciation to improve the efficiency of investment projects in the mining industry. *Mineral resources of Russia. Economics and Management*. 2011; 1: 33-35. (In Russ.)].

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Андрей Васильевич Матвеев** –  
старший преподаватель кафедры открытых горных  
работ и электромеханики, ФГБОУ ВО «Сибирский  
государственный индустриальный университет», 654007,  
г. Новокузнецк, Российская Федерация,  
e-mail: matveev-av@yandex.ru

### ABOUT THE AUTHOR

**Andrey V. Matveev** –  
Senior Lecturer of the Department of Open-pit Mining and  
Electromechanics, Siberian State Industrial University,  
654007, Novokuznetsk, Russian Federation,  
e-mail: matveev-av@yandex.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.05.2025.

Поступила после рецензирования: 01.07.2025.

Принята к публикации: 27.07.2025.

### Article info

Received: 20.05.2025.

Revised: 01.07.2025.

Accepted: 27.07.2025.