

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ПОЛУСКАЛЬНЫХ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД ЭКСКАВАТОРНО- АВТОМОБИЛЬНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХЛОПАТ

*В.С. Федотенко, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация;
В.В. Чаплыгин, А.В. Матвеев, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк, Российская Федерация*

Аннотация: В статье приведены результаты исследований оптимизации параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат. Проанализированы имеющиеся методики для расчета производительности мехлопат. Установлена для всех типов современных механических лопат эмпирическая универсальная зависимость расчета величины коэффициента экскавации от среднего диаметра куска, которая позволяет определить изменение величины сменной эксплуатационной производительности механических лопат от величины среднего размера кусков взорванных пород. Результаты статистической обработки сравнения значений производительности экскаватора, установленной в производственных условиях, с расчетными показали, что коэффициент вариации при расчете по предлагаемой (новой, универсальной) формуле практически в два раза ниже, по сравнению с известными (применяемыми). Определена укрупненная блок-схема комплексного алгоритма оптимизации параметров ЭАКМЛ путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа мехлопаты, автосамосвала, бурового станка и бульдозера.

Ключевые слова: механическая лопата, производительность экскаватора, средний размер куска, коэффициент экскавации, коэффициент вариации, удельный расход ВВ, блок-схема алгоритма, ЭКГ.

Для цитирования: 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. С. 17-31. DOI: 10.56195/20793332_2024_1_17_31.

OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF THE TECHNOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF SEMI-HORIZONTAL OVERBURDEN BY EXCAVATOR- AUTOMOTIVE COMPLEXES USING MECHANICAL SHOVELS

V.S. Fedotenko, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

V.V. Chaplygin, A.V. Matveev, FGBOU VO «Siberian State Industrial University», Novokuznetsk, Russian Federation

Abstract: The article presents the results of research on the optimization of the parameters of the technology for the development of semi-horizontal overburden by excavator-automobile complexes using mechlopat. The available methods for calculating the productivity of mechlopat are analyzed. An empirical universal dependence of the calculation of the value of the excavation coefficient on the average diameter of the piece has been established for all types of modern mechanical shovels, which makes it possible to determine the change in the value of the replaceable operational performance of mechanical shovels from the value of the average size of pieces of blasted rocks. The results of statistical processing of comparing the values of the excavator performance installed in production conditions with the calculated ones showed that the coefficient of variation when calculated according to the proposed (new, universal) formula is almost two times lower than the known (used) ones. An enlarged block diagram of a complex algorithm for optimizing the parameters of the EACMS is determined by selecting the value of the specific consumption of explosives, the type of a mechanical shovel, dump truck, drilling rig and bulldozer.

Keywords: mechanical shovel, excavator performance, average piece size, excavation coefficient, coefficient of variation, specific explosive consumption, block diagram of the algorithm, crawler mining excavator.

For citation: 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. Surveying and subsoil use. 2024;(1): 17-31.(In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_1_17_31.

Экскаваторно-автомобильные комплексы с применением мехлопат (ЭАКМЛ) широко используются при открытом способе добычи полезных ископаемых. На разрезах Кузбасса ОАО УК «Кузбассразрезуголь» осуществляет добычу угля на 6 угольных разрезах. Балансовые запасы компании — 2 млрд т. Ежегодная добыча составляет свыше 45 млн т угля, из которых около 50% экспортируется за рубеж. На разрезах ОАО УК «Кузбассразрезуголь» используются высокопроизводительное выемочно-погрузочное и транспортное оборудование большой единичной мощности [1, 2]. Одними из них являются американские экскаваторы Р&Н-4100 с вместимостью ковша 56 м³. Первый из них эксплуатируется с 2009 г. на Талдинском разрезе, второй — с 2011 г. на Бачатском разрезе. На разрезах компании используются экскаваторы указанного производителя Р&Н-2300 и Р&Н-2800, которые также хорошо себя зарекомендовали [3].

Экскаватор отечественного производства ЭКГ-32Р «прямая механическая лопата» хорошо себя показывает на Краснобродском разрезе. Он может работать в различных природных условиях, вплоть до температуры -45°, а наступление капитального ремонта наступит только через 20 лет.

Перечисленные экскаваторы выполняют погрузку взорванной вскрышной породы в высокопроизводительные автосамосвалы производства Белорусского автомобильного завода — БелАЗы: 75131, 75302 (75306) и 75609 грузоподъемностью 130, 220 и 320 т соответственно.

Известно, что электрические экскаваторы являются доминирующим погрузочным оборудованием при добыче полезных ископаемых открытым способом и для количественной оценки эффективности их работы предлагается введение определенного стохастического показателя [4].

Общепризнанным показателем, который позволяет сравнивать эффективность работы механических лопат и определить диапазон использования каждой, является его производительность. Следовательно, для расчета и оптимизации параметров ЭАКМЛ, основой методики являются формулы для расчета производительности механических лопат в зависимости от средневзвешенного размера кусков взорванных пород. Кроме того, требуется применение соответствующих методов для расчета параметров буровзрывных работ и расчета удельных затрат по всем основным процессам исследуемой технологии [5].

Методы и материалы исследований

На первом этапе исследований была поставлена задача проанализировать существующие зависимости, известных формул для расчета величины производительности механической лопаты при различной кусковатости взорванных горных пород.

Было установлено, что расчет производительности экскаватора с определенным размером ковша (E — вместимость ковша) основан на формулах, которые связывают такие параметры, как коэффициент экскавации (K_s), время цикла (t_u) и размер кусков взорванной породы (d_{cp}). При этом установленные эмпирические формулы основываются на опыте работы мехлопат ЭКГ-4,6 и ЭКГ-8И [6, 7].

Коэффициент экскавации:

$$K_s = \frac{K_n}{K_p} = \frac{1,18 \cdot e^{\frac{6,5 d_{cp}^3}{E^{1,2}}}}{\frac{d_{cp}^2}{0,75 \cdot \sqrt[3]{E^2}} e^{\frac{d_{cp}^2}{0,56 \sqrt[3]{E^2}}} + 1,35}, \quad (1)$$

где K_n — коэффициент наполнения ковша; K_p — коэффициент разрыхления породы; d_{cp} — диаметр среднего (по объему) куска взорванной горной массы, м; e — основание натурального логарифма; E — емкость ковша, м³.

Длительность экскаваторного цикла:

$$t_u = \frac{67 d_{cp}^2}{E} + \frac{E}{0,11E + 0,6} + \sqrt[3]{\frac{(35 \cdot E + 0,42 \cdot E^2)^{\frac{5}{3}} \cdot \beta_n^2}{E}} + 3, c, \quad (2)$$

где β_n — угол поворота экскаватора, град.

Техническая производительность экскаватора:

$$Q_{\text{эк}} = \frac{3600 \cdot E \cdot 1,18 \cdot e^{\frac{6,5 d_{cp}^3}{E^{1,2}}}}{\left(\frac{67 d_{cp}^2}{E} + \frac{E}{0,11E + 0,6} + \sqrt[3]{\frac{(35 \cdot E + 0,42 \cdot E^2)^{\frac{5}{3}} \cdot \beta_n^2}{E}} + t_p \right) \cdot \left(\frac{d_{cp}^2}{0,75 \cdot \sqrt[3]{E^2}} e^{\frac{d_{cp}^2}{0,56 \sqrt[3]{E^2}}} + 1,35 \right)}, m^3/h. \quad (3)$$

Разработчики метода предлагают оптимизировать выемочно-погрузочные работы и технологические схемы работы экскаваторно-автомобильного комплекса путем минимизации суммарных затрат. Уменьшение затрат на буровзрывную подготовку пород к выемке достигается при увеличении размера кусков взорванных пород, но издержки на экскавацию и транспорт возрастают. Однако возникают сомнения в надежности расчета по формулам 1-3 для современных механических лопат большой единичной мощности [6, 7].

В работе [8] предлагаются упрощенные формулы, полученные при математической обработке зависимостей 1, 2 и 3.

Продолжительность экскаваторного цикла при совмещении ряда вспомогательных операций определяется из выражения общего вида:

$$t_u = t_u + t_n + t_p, c, \quad (4)$$

где t_u — время черпания, с; t_n — суммарная продолжительность поворотных операций к месту разгрузки и обратно в забой, с; t_p — время разгрузки, с.

$$t_u = \frac{67 d_{cp}^2}{E} + \frac{E}{0,11E + 0,6}, c, \quad (5)$$

где d_{cp} — средневзвешенный по объему диаметр кусков, м; E — геометрическая вместимость ковша экскаватора, м³.

$$t_n = \left(\frac{(35E + 0,42 E^2)^{1,67} \beta_n^2}{E} \right)^{0,33}, c, \quad (6)$$

где β_n — угол поворота экскаватора, град.

$$K_s = 0,83 \exp(-2 \frac{d_{cp}^5}{E^{0,2}}). \quad (7)$$

Техническая производительность экскаватора:

$$Q_{\text{эк}} = \frac{3600 \cdot E \cdot 0,83 \exp(-2 \frac{d_{cp}^5}{E^{0,2}})}{\left(\left(\frac{67 d_{cp}^2}{E} + \frac{E}{0,11E + 0,6} \right) + \left(\frac{(35E + 0,42 E^2)^{1,67} \beta_n^2}{E} \right)^{0,33} + 3 \right)}, m^3/h. \quad (8)$$

Невозможно подтвердить точность расчета по формулам 4-8 для современных механических лопат большой мощности без исследований, которые оценивают результаты расчета по установленным зависимостям.

В настоящее время проведение масштабных исследований о влиянии на производительность экскаватора кусковатости взорванных пород является сложной задачей. В связи с этим, результаты исследований экскаватора Вискус 495HD с ковшом вместимостью 41,3 м³, полученные при работе на разрезе «Тугнуйский», заслуживают внимания [9].

Вес породы в ковше:

$$G = \frac{56,65}{D_{св}^{0,287}}, m, \quad (9)$$

где $D_{св}$ – средневзвешенный по объему диаметр кусков, м; E – геометрическая вместимость ковша экскаватора, м³.

Время цикла экскаватора:

$$t_u = t_n + 17,94 = 9 \times e^{0,7 D_{св}} + 17,94, c, \quad (10)$$

Годовая производительность экскаватора:

$$Q_{год} = \frac{(3600 \cdot G \cdot T_{см} \cdot n_{см} \cdot n_{год} \cdot K_{из} \cdot K_{изэ})}{T_u} = \frac{3600 \cdot \left(\frac{56,65}{D_{св}^{0,287}} \right) \cdot T_{см} \cdot n_{см} \cdot n_{год} \cdot K_{из} \cdot K_{изэ}}{(9 \cdot e^{0,7 D_{св}} + 17,94)}, m^3 / год, \quad (11)$$

где $T_{см}$ – продолжительность смены, ч; $n_{см}$ – число рабочих смен в сутки; $n_{год}$ – число рабочих дней в году; $K_{из}$ – коэффициент использования экскаватора в течение смены; $K_{изэ}$ – коэффициент использования рабочего времени экскаватором в течение года.

Вилкул Ю.Г. и Перегудов В.В. [10] по результатам исследования экскаватора ЭКГ-8И предлагают следующую формулу для расчета его сменной производительности:

$$Q_{сч} = \frac{V_{тр} \cdot 3600 \cdot T_{см} \cdot K_{из} - N_{нег} \cdot t_{нег1}}{t_{ож} + t_{уст} + \left(\frac{z_1 \cdot d_{ср}^2}{E} + \frac{E}{yE + 0,6} + t_{пов1} + t_{раз} + t_{пов2} \right) \cdot \frac{V_{тр} \cdot K_p}{E \cdot K_n}}, m^3 / см, \quad (12)$$

где $V_{тр}$ – объем, перевозимый одним автосамосвалом, м³; $T_{см}$ – время смены экскаватора, ч; $K_{из}$ – коэффициент использования экскаватора во времени, %; $N_{нег}$ – количество негабаритных кусков на блоке, которые необходимо убрать в течение смены; $t_{нег1}$ – время на разборку одного негабаритного куска, с; $t_{ож}$, $t_{уст}$ – время ожидания и установки автосамосвала под погрузку, с; $d_{ср}$ – диаметр среднего куска взорванной горной массы, м; $t_{пов1,2}$ – время поворота экскаватора к автосамосвалу и обратно к забою, соответственно, с; $t_{раз}$ – время разгрузки ковша, с; E – вместимость ковша, м³; K_p – коэффициент разрыхления горной массы; K_n – коэффициент наполнения ковша.

Для расчета производительности авторами предлагается учитывать объем, перевозимый одним автосамосвалом, количество негабаритных кусков на блоке, которые необходимо убрать в течение смены и время на разборку негабарита в течение смены. Методически не верно связывать произво-

дительность экскаватора с применяемым типом автосамосвалов, при этом довольно сложно прогнозировать количество негабаритных кусков на блоке и время на его уборку в течение смены.

В работе [11] отмечается важность согласования типов экскаватора и автосамосвала, особенно на крупных предприятиях.

Казагаповым А.Е., Куттыбаевым А.Е., Саменовым Г., Петрунько А.Н. в работе [12] описывается определение производительности для экскаваторов ЭКГ-6,3УС и ЭКГ-8И:

$$Q_m = \frac{3600 \cdot E}{\left[t_u + \frac{p'(x_7) \cdot E}{100 \cdot V_n} \cdot t_n \right]} \cdot \frac{k_{нк}}{k_{рк}}, m^3 / ч, \quad (13)$$

где t_u – продолжительность цикла экскавации, с; E – вместимость ковша экскаватора, м³; t_n – продолжительность извлечения и уборки одного негабаритного куска, с; $p'(x_7)$ – выход негабаритных кусков, %; V_n – средний объем негабаритного куска, м³; $k_{нк}$ – коэффициент наполнения ковша; $k_{рк}$ – коэффициент разрыхления породы в ковше.

$$k_{рк} = 10^{-3} \times [1623 - 5,61p'(x_1) + 2,52 \times p'(x_2) + 12,2 \times p'(x_3)] + 10^{-3} \times [5,84 \times p'(x_4) - 0,3 \times p'(x_5) + 1,18 \times p'(x_6)], \quad (14)$$

где $p'(x_1)$ – гранулометрический состав группы фракций 0-0,2 м, %; $p'(x_2)$ – гранулометрический состав группы фракций 0,21-0,4 м, %; $p'(x_3)$ – гранулометрический состав группы фракций 0,41-0,6 м, %; $p'(x_4)$ – гранулометрический состав группы фракций 0,61-0,8 м, %; $p'(x_5)$ – гранулометрический состав группы фракций 0,81-1,0 м, %; $p'(x_6)$ – гранулометрический состав группы фракций > 1,2 м, %.

$$k_{нк} = \frac{Q_{мп} \cdot k_{рк}}{n \cdot E \cdot \rho_0}, \quad (15)$$

где $Q_{мп}$ – масса руды (пустой породы) в транспортном сосуде; n – число ковшей, помещенных в транспортный сосуд; ρ_0 – плотность руды (пустой породы).

В качестве критерия для расчета производительности экскаваторов авторы предлагают использовать гранулометрический состав группы фракций взорванной породы и выход негабаритных кусков. Это значительно усложняет возможность расчета из-за сложности его оперативного определения, особенно в производственных условиях. Кроме того, при применении современных экскаваторов вероятно потребуется произвести дополнительные исследования с целью установления соответствия типа экскаватора и учитываемого выхода определенных групп фракций взорванной породы и как считать выход негабаритных кусков для конкретного типа мехлопаты.

На рис. 1-5 приведены графические зависимости сменной производительности экскаватора от диаметра куска взорванной массы для мехлопат с ковшами 6,3; 18; 33; 41,3; 55,8 м³, где представлены результаты расчета по формулам, разработанным Н.Я. Репиным; Вилкула Ю.Г. с Перегудовым В.В.; Сыроевым А.А. и Исaiченковым А.Б. (для $E = 41,3$ м³).

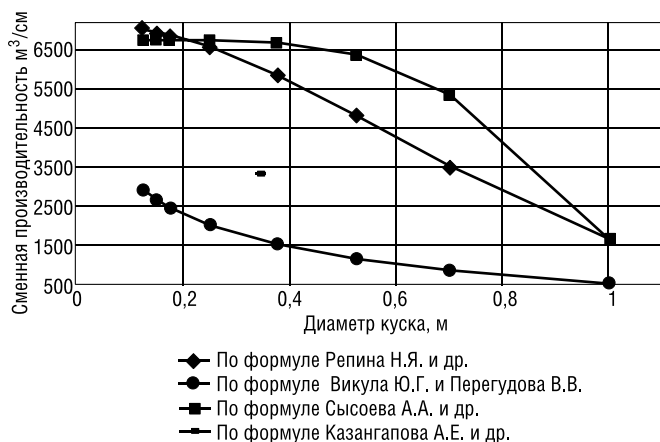


Рис. 1. Зависимость производительности экскаватора с ковшом 6,3 м³ от размера куска по различным методикам

Fig. 1. The dependence of the productivity of an excavator with a bucket of 6.3 m³ on the size of the piece according to various methods

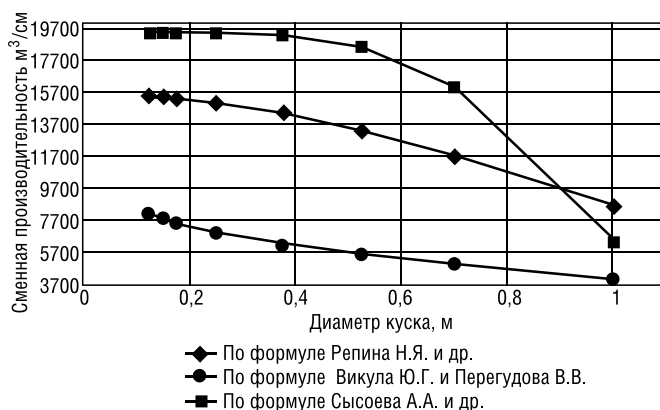


Рис. 2. Зависимость производительности экскаватора с ковшом 18 м³ от размера куска по различным методикам

Fig. 2. The dependence of the productivity of an excavator with a bucket of 18 m³ on the size of the piece according to various methods

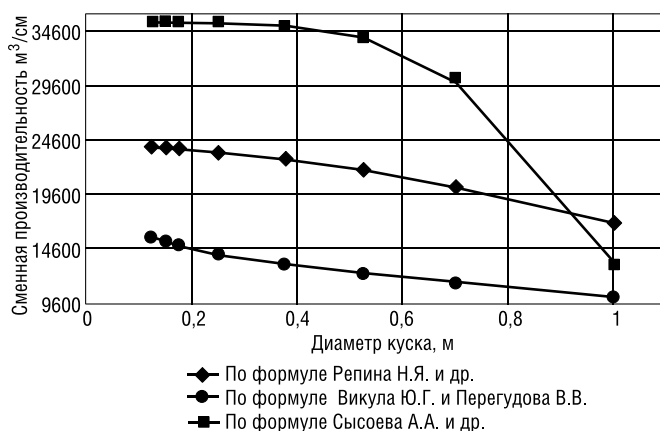


Рис. 3. Зависимость производительности экскаватора с ковшом 33 м³ от размера куска по различным методикам

Fig. 3. The dependence of the productivity of an excavator with a bucket of 33 m³ on the size of the piece according to various methods

Первое, что важно отметить при сравнении полученных графических зависимостей, это значительное различие величины сменной производительности экскаватора от диа-

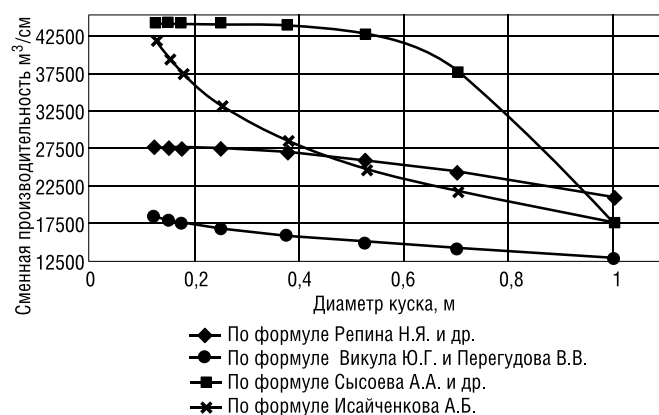


Рис. 4. Зависимость производительности экскаватора с ковшом 41,3 м³ от размера куска по различным методикам

Fig. 4. The dependence of the productivity of an excavator with a bucket of 41.3 m³ on the size of the piece according to various methods

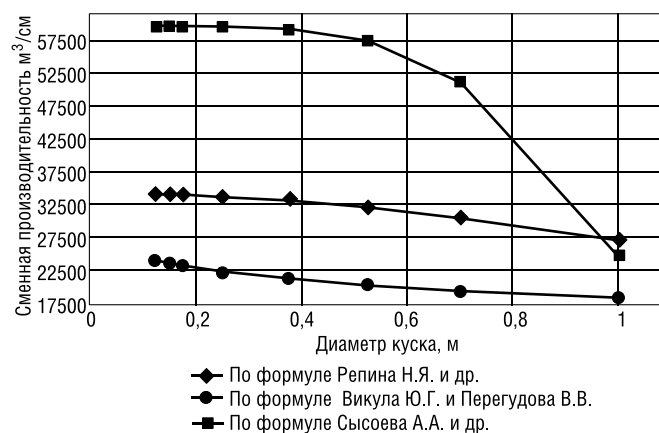


Рис. 5. Зависимость производительности экскаватора с ковшом 55,8 м³ от размера куска по различным методикам

Fig. 5. The dependence of the productivity of an excavator with a bucket of 55.8 m³ on the size of the piece according to various methods

метра куска взорванной массы, значения которых для конкретного типа мехлопаты иногда различаются более, чем в два раза. К сожалению, разработчики представленных выше формул расчета производительности мехлопат не указывают диапазон достоверности установленных ими зависимостей, например – вместимости ковша экскаватора. Формула Репина Н.Я. была установлена, когда на разрезах применялись, в основном, экскаваторы ЭКГ-4,6 и ЭКГ-8И, однако принятая в ней зависимость, учитывающая влияние соотношения кусковатости разрабатываемых пород и вместимости ковша, позволяет достоверно определять производительность и для большинства современных типов мехлопат.

С целью сравнения расчетных формул и закономерности изменения производительности мехлопат в зависимости от значений средневзвешенного куска взорванной породы и вместимости ковша, были построены графики изменения величины коэффициента

$$K_Q = f \frac{Q_{\text{ср.масс.}}}{Q_{\text{ср.мин.}}}$$

от вместимости ковша. (рис. 6).

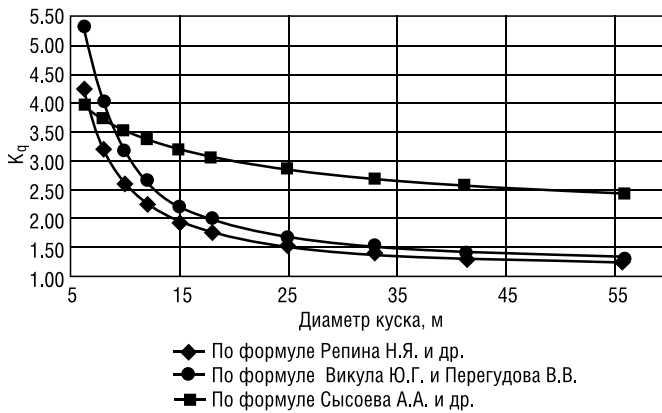


Рис. 6. Графики изменения величины коэффициента

$$K_Q = f \frac{Q_{\text{сменный}}}{Q_{\text{сменный}}}$$

от вместимости ковша экскаватора

Fig. 6. Graphs of the change in the coefficient

$$K_Q = f \frac{Q_{\text{сменный}}}{Q_{\text{сменный}}}$$

value from the bucket capacity of the excavator

Как видно из графика, общую тенденцию изменения коэффициента K_Q нарушают расчеты по формуле Сыроева А. А.

Возникает вопрос, являются ли рассчитанные по формуле Репина Н.Я. и по формуле Вилкула Ю.Г. значения производительности экскаваторов-мехлопат в зависимости от средневзвешенного размера куска взорванных пород статистически достоверными (статистически значимыми) или недостоверными (случайными).

Самым распространенным методом оценки различий между выборками считается параметрический критерий Фишера, который является критерием достоверности различий.

Критерий Фишера (F) предполагает вычисление средних значений и дисперсий в сравниваемых выборках. Он целесообразен к применению в тех случаях, когда возникают сомнения в достоверности различий [13].

Результаты сравнения расчетных значений производительности мехлопат по формулам Репина Н.Я. и Вилкула Ю.Г. (два ряда переменных) по критерию Фишера на предмет их различий, свидетельствуют о том, что для пятипроцентного уровня значимости ($P \leq 0,05$) граничное (критическое) значение критерия $F_{\text{гр}} = 3,18$. Следовательно (при $F_{\text{эм}} = 1,87 \leq F_{\text{гр}} = 3,18$), различие между выборками статистически не достоверно. Расчеты показали, что различия между выборками производительности мехлопат по формулам Репина Н.Я. и Вилкула Ю.Г. не могут быть случайными, считаются достоверно отличающимися друг от друга, т. е. принадлежит разным генеральным совокупностям.

Таким образом, как показал проведенный анализ расчета производительности карьерных мехлопат, существует большое количество методик со своей областью применения, что не позволяет их считать универсальными для расчета в различных горнотехнических условиях разрезов. Поэтому следующая задача для достижения главной цели исследований — обоснование параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород на разрезах Кузбасса экска-

торно-автомобильными комплексами с применением мехлопат, обеспечивающих оптимальные условия их эксплуатации. Для ее реализации на основании сопоставления в горнотехнических условиях разреза различных типов экскаваторного, автотранспортного оборудования и параметров БВР потребуется разработка новой специальной и универсальной методики. Ее главной составляющей должна быть универсальная формула расчета производительности мехлопат в зависимости от средневзвешенного размера куска взорванных пород для всех применяемых в настоящее время типов экскаваторов.

Специалистам известна расчетная формула для определения величины технической производительности механических лопат, которая включает значения коэффициента экскавации K_3 :

$$Q_{\text{тч}} = \frac{3600 \cdot E \cdot K_3 \cdot K_3}{t_{\text{ц}}}, \text{ м}^3 / \text{ч}, \quad (16)$$

где K_3 — коэффициент экскавации; K_3 — коэффициент влияния параметров забоя (для торцевого забоя $K_3 = 0,9$; для типового $K_3 = 0,8$); $t_{\text{ц}}$ — время цикла экскаватора в конкретных горнотехнических условиях, с;

$$K_3 = \frac{K_{\text{нк}}}{K_{\text{рк}}}, \quad (17)$$

где $K_{\text{нк}}$ — коэффициент наполнения ковша; $K_{\text{рк}}$ — коэффициент разрыхления породы в ковше.

По определению технической производительностью является наибольшая возможная часовая производительность экскаватора при непрерывной его работе в конкретных горнотехнических условиях [14].

Обычно сравнение экскаваторов производят по их сменной эксплуатационной производительности, величина которой характеризует объем работы, который выполняет экскаватор за смену с учетом затрат времени на технические, технологические и организационные перерывы [9, 14, 15]:

$$Q_{\text{сч}} = \frac{3600 \cdot E \cdot K_3 \cdot K_3}{t_{\text{ц}}} \cdot T_{\text{см}} \cdot K_{\text{ис}}, \text{ м}^3 / \text{см}, \quad (18)$$

где $T_{\text{см}}$ — продолжительность смены, ч; $K_{\text{ис}}$ — коэффициент использования экскаватора в течение смены.

Величина коэффициента использования экскаватора в течение смены определяется применяемым видом карьерного транспорта и схемой его подачи.

Рассмотренные выше формулы для расчета производительности механических лопат в зависимости от величины среднего размера кусков взорванных пород учитывают значения величины коэффициента экскавации. Из этого следует необходимость поиска других результатов исследования соотношения величины коэффициента экскавации от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород или произвести дополнительные уточняющие эксперименты.

В этой связи представляет интерес исследование [16], одним из результатов которых являются значения коэффициента экскавации K_3 для скальных и полускальных раз-

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты экскавации для скальных и полускальных разрыхленных пород при условии нормального (полного) заполнения ковша (по Ржевской С.В.)/
The coefficient of excavation for rocky and semi-horizontal loosened rocks under the condition of normal (full) filling of the bucket (according to S.V. Rzhevskaya)

Средний размер куска, $d_{ср}$, см / Average piece size, cm	Емкость ковша (черпака) кубообразной формы (верхний предел), m^3 / The capacity of the bucket (ladle) of a cuboid shape (upper limit), m^3											
	0,5	1	4	6	8	10	15	20	25	35	40	80
	Коэффициент экскавации K_3											
До 5	0,70	0,75	0,80	0,80	0,85	0,85	0,85	0,85	0,90	0,90	0,90	0,90
5-10	0,50	0,6	0,70	0,75	0,80	0,80	0,80	0,85	0,90	0,90	0,90	0,90
10-15	0,30	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,73	0,73	0,73	0,73
15-20	-	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,70	0,73	0,73
20-30	-	-	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,68	0,70	0,70
30-45	-	-	-	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,64	0,68	0,68
45-60	-	-	-	-	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,64	0,64
60-80	-	-	-	-	-	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,60
80-120	-	-	-	-	-	-	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,55

Таблица 2 / Table 2

Значения величины K_3 для экскаваторов с различной вместимостью ковша в зависимости от $d_{св}$
The values of the K_3 value for excavators with different bucket capacities, depending on the $d_{св}$

Коэффициенты экскавации для скальных и полускальных разрыхленных пород при условии нормального (полного) заполнения ковша (по Ржевской С.В.) / The coefficient of excavation for rocky and semi-horizontal loosened rocks under the condition of normal (full) filling of the bucket (according to S.V. Rzhevskaya)									
№ п/п	$d_{св}$, м	Типы мехлопат, принятых к исследованию; вместимость ковша							
		ЭКГ-6,3	ЭКГ-8	ЭКГ-10	ЭКГ-15	ЭКГ-20	ЭКГ-25	РН-2800ХРС (33 m^3)	РН-4100ХРС (55,8 m^3)
1	0,125	0,51	0,55	0,60	0,65	0,68	0,73	0,73	0,73
2	0,175	0,46	0,50	0,55	0,60	0,63	0,70	0,70	0,73
3	0,250	0,41	0,45	0,50	0,55	0,58	0,65	0,67	0,70
4	0,375	0,36	0,40	0,45	0,50	0,53	0,60	0,63	0,68
5	0,525	-	0,35	0,40	0,45	0,48	0,55	0,59	0,65
6	0,700	-	-	0,35	0,40	0,43	0,50	0,54	0,60
7	1,000	-	-	-	0,35	0,38	0,45	0,49	0,55

рыхленных пород при условии нормального (полного) заполнения ковша от соотношения диаметра среднего куска взорванной горной массы (по объему) и вместимости ковша экскаватора кубообразной формы, представленные в табл. 1.

С целью определения корреляционной зависимости $K_3 = f(E, d_{св})$ на основании данных табл. 1 произведен расчет значений коэффициента для принятых к исследованию типов мехлопат, которые соответствуют определенным значениям средневзвешенного размера кусков взорванных пород — $d_{св}$ и приведены в табл. 2.

На следующем этапе исследований были построены графики (в виде точечной диаграммы) изменения зависимости $K_3 = f(d_{св})$ для всех типов мехлопат, принятых к исследованию (см. табл. 2).

Результаты исследований

Визуальная оценка, проведенная на основе графического анализа данных, позволила установить наличие нелинейной корреляционной связи между параметрами K_3 и $d_{св}$ и вид математической зависимости между этими величинами. Были приняты к рассмотрению три варианта зависимости $K_3 = (a \times E^x) / d_{св}^y$.

Для каждого типа экскаватора (E) были установлены формулы для расчета K_3 с числовыми значениями параметров x и y , например $K_3 = (0,191) / d_{св}^{0,262}$, по совокупности которых определялась общая расчетная зависимость для всех типов мехлопат.

После статистической оценки полученных зависимостей, результаты расчета по формуле (19) оказались корректнее:

$$K_3 = \frac{(0,220 \cdot E^{0,234})}{d_{cp}^n}, \quad (19)$$

$$\text{где } n = \frac{0,234}{E^{0,220}}.$$

Она показала достаточно высокую достоверность расчета коэффициента экскавации по данным Ржевской С.В. для каждого из принятых типов мехлопат:

- ✧ среднее линейное отклонение 0,005-0,069;
- ✧ среднее квадратическое отклонение 0,032-0,096 %
- ✧ коэффициент вариации 7,54-18,12 % при среднем значении 12,3%.

Установленная для всех типов современных механических лопат эмпирическая универсальная зависимость расчета величины $K_3 = f(d_{cb})$ (19) позволяет определить изменение величины сменной эксплуатационной производительности механических лопат от величины среднего размера кусков взорванных пород. Подставив зависимость (19) в (18) после преобразования получим:

$$Q_3 = \frac{3600 \cdot E \cdot T_{cm} \cdot \frac{0,22 \cdot E^{0,234}}{d_{cp}^{0,234}} \cdot K_3 \cdot K_{из}}{\frac{67d_{cp}^2}{E} + \frac{E}{0,11E+0,6} + \sqrt[3]{\frac{(35 \cdot E + 0,42 \cdot E^2)^5 \cdot \beta_n^2}{E}} + t_p}, \text{ м}^3 / \text{см}. \quad (20)$$

Следует сказать, что в формуле (20) величина время цикла экскаватора принята по зависимости (2), которая также, как K_3 , учитывает изменение значений среднего размера кусков взорванных пород [6, 7].

Для сравнения производительности мехлопат рассчитанной по универсальной формуле с фактическими, были установлены значения их сменной величины в производ-

ственных условиях тех разрезов Кузбасса, где применяются принятые к сравнению типы мехлопат. Производительность экскаваторов в производственных условиях, средневзвешенный размер кусков взорванной породы и параметры БВР представлены в табл. 3.

На основании полученных данных с учетом свойств пород, параметров БВР и величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород — d_{cb} , был произведен расчет сменной производительности для всех принятых типов экскаваторов, по формулам 3, 8 и 20 (новая, универсальная). Результаты расчета производительности представлены в табл. 4.

Результаты статистической обработки сравнения значений производительности экскаватора, установленной в производственных условиях, с расчетными показали, что коэффициент вариации при расчете по предлагаемой (новой, универсальной) формуле практически в два раза ниже, по сравнению с известными (применяемыми).

На рис. 7 приведена укрупненная блок-схема комплексного (универсального) алгоритма расчета и оптимизации параметров технологического комплекса при разработке механическими лопатами вскрышных пород карьеров с применением автотранспорта в определенных условиях его работы.

Обсуждение результатов исследований

Предлагаемая формула (20) для расчета производительности механических лопат в зависимости от средневзвешенного размера кусков взорванных пород позволяет решать различные задачи при оптимизации параметров экскаваторно-автотранспортного комплекса с применением мехлопат (ЭАКМЛ):

- ✧ выбор величины удельного расхода ВВ в определенных условиях его работы;
- ✧ выбора типа мехлопаты путем сравнения их технико-экономических показателей по величине суммарных удельных затрат экскаваторно-автотранспортного комплекса;

Таблица 3 / Table 3

Значения величины K_3 для экскаваторов с различной вместимостью ковша в зависимости от d_{cb}
The values of the K_3 value for excavators with different bucket capacities, depending on the d_{cb}

Тип ЭКГ / Type of mining crawler excavator	Разрез / Quarry	Группа пород, коэф. креп. Прот. / Rock group, Protodyakonov strength coefficient	Параметры БВР / Parameters of drilling and blasting operations		d_{cb} , м / d_{cb} , m	Q_3 см, $T_{cm} = 12$ м³/см
			Уд. расх. ВВ; кг/м³	Сетка скв., м		
ЭКГ-6,3	АО «УК «Кузбассразрезуголь», филиал «Калтанский угольный разрез», г. Калтан.	III-50%, IV-50%, 6-8	0,52	6×6	0,76	1752
ЭКГ-8	УК «Южный Кузбасс», г. Междуреченск	III-20%, IV-80%, 7-9	0,59	6×6	0,77	2520
ЭКГ-10	АО «УК «Кузбассразрезуголь», филиал «Талдинский угольный разрез», г. Новокузнецк	III-40%, IV-60%, 7-9	0,46	6×7	0,79	2688
ЭКГ-12	АО «УК «Кузбассразрезуголь», филиал «Краснобродский угольный разрез», пгт. Краснобродский	IV-100%, 8-11	0,43	6×6	0,81	3348
ЭКГ-15	УК «Южный Кузбасс», г. Междуреченск	III-50%, IV-50%, 6-8	0,51	5×6	0,83	4572
ЭКГ-18	АО «УК «Кузбассразрезуголь», филиал «Краснобродский угольный разрез», пгт. Краснобродский	III-20%, IV-80%, 7-9	0,58	6×7	0,85	4716
ЭКГ-25	АО «УК «Кузбассразрезуголь», филиал «Бачатский угольный разрез», пгт. Бачатский	III-30%, IV-70%, 6-8	0,64	7×7	0,87	9960
РН-2800ХРС (33 м³)	УК «Южный Кузбасс», г. Междуреченск	III-20%, IV-80%, 7-9	0,62	6×7	0,89	14004
WK-45 (41,3 м³)	АО «УК «Кузбассразрезуголь», филиал «Бачатский угольный разрез», пгт. Бачатский	IV-100%, 8-11	0,60	6×6	0,90	16512
РН-4100ХРС (55,8 м³)	АО «УК «Кузбассразрезуголь», филиал «Талдинский угольный разрез», г. Новокузнецк	IV-100%, 8-11	0,60	6×6	0,92	21888

- ✧ выбор технических средств (автосамосвала, бурового станка, бульдозера) разной производительности и стоимости;
- ✧ комплексная задача – выбор (в пределах определенных заданных значений и типов оборудования) величины удельного расхода ВВ, типа: мехлопаты, автосамосвала, бурового станка и бульдозера.

Выводы

В результате проведенных исследований установлены:

1) Эмпирическая зависимость изменения коэффициента экскавации при различных значениях величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород для механических лопат с вместимостью ковша экскаватора от 6,3 до $E = 55,8 \text{ м}^3$. Статистическая оценка эмпирической формулы (19), показала высокую достоверность расчета коэффициента экскавации для каждого из принятых типов мехлопат:

- ✧ среднее линейное отклонение 0,016-0,080;
- ✧ среднеквадратическое отклонение 0,048-0,098 %
- ✧ коэффициент вариации 8,40-18,41 % при среднем значении 13,3%.

2. Эмпирическая зависимость расчета величины $K_3 = f(d_{св})$ (19) позволила установить единую универсальную формулу для определения изменения производительности меха-

нических лопат от величины среднего размера кусков взорванных пород (20).

Сравнения производительности мехлопат рассчитанные по универсальной формуле (20) с фактическими, которые были установлены в производственных условиях тех разрезов Кузбасса, где применяются принятые к сравнению типы мехлопат, показало высокую достоверность расчета по установленной формуле. Коэффициент вариации при расчете по предлагаемой (новой, универсальной) формуле – 17,7%, что практически в два раза ниже, по сравнению с известными (применяемыми).

3) Единая универсальная формула (20) для расчета производительности современных механических лопат является основой для разработки алгоритма (рис. 7) и методики оптимизации параметров основных процессов исследуемой технологии в определенных условиях разреза, и позволяет также минимизировать издержки и учитывать изменение горнотехнических условий (расстояние транспортирование пород до отвала; категорию разрабатываемых пород и т. п.) при эксплуатации технологического комплекса или на стадии проектирования, путем перебора различных типов основного оборудования (экскаваторов, транспортных средств и т. п.) с целью сокращения издержек при разработке пород экскаваторно-автомобильными комплексами.

Таблица 4 / Table 4

Значения фактической и расчетных значений производительности экскаватора и результаты их статистического сравнения
The values of the actual and calculated values of the excavator performance and the results of their statistical comparison

Тип ЭКГ / Type of mining crawler excavator	$d_{св}, \text{ м} / d_{св}, \text{ м}$	Факт. $Q_3, \text{ см}, \text{ м}^3/\text{см} / \text{Actual } Q_3, \text{ см}, \text{ м}^3/\text{см}$	Расчетные $Q_3, \text{ см}, \text{ м}^3/\text{см} / \text{Settlement } Q_3, \text{ см}, \text{ м}^3/\text{см}$		
			По форм. 3	По форм. 8	По форм. 20
ЭКГ-6,3	0,76	1752	3111	3802	2068
ЭКГ-8	0,78	2520	4200	4608	2716
ЭКГ-10	0,79	2688	5538	5606	3494
ЭКГ-12	0,81	3348	6737	6327	4246
ЭКГ-15	с3	4572	8530	7385	5378
ЭКГ-18	0,85	4716	10222	8246	6494
ЭКГ-25	0,87	9960	14130	10460	9092
ЭКГ-33	0,89	14004	18198	12544	11963
ЭКГ-41,3	0,9	16512	22148	14716	14857
ЭКГ-55,8	0,92	21888	28260	17670	19641
Среднее арифметическое по форм.			12107	9136	7995
Среднее линейное отклонение ($\Sigma \Delta y/n$)			3911	2435	1161
Среднеквадратическое отклонение			4442	2783	1419
Коэффициент вариации, %			36,7	30,5	17,7

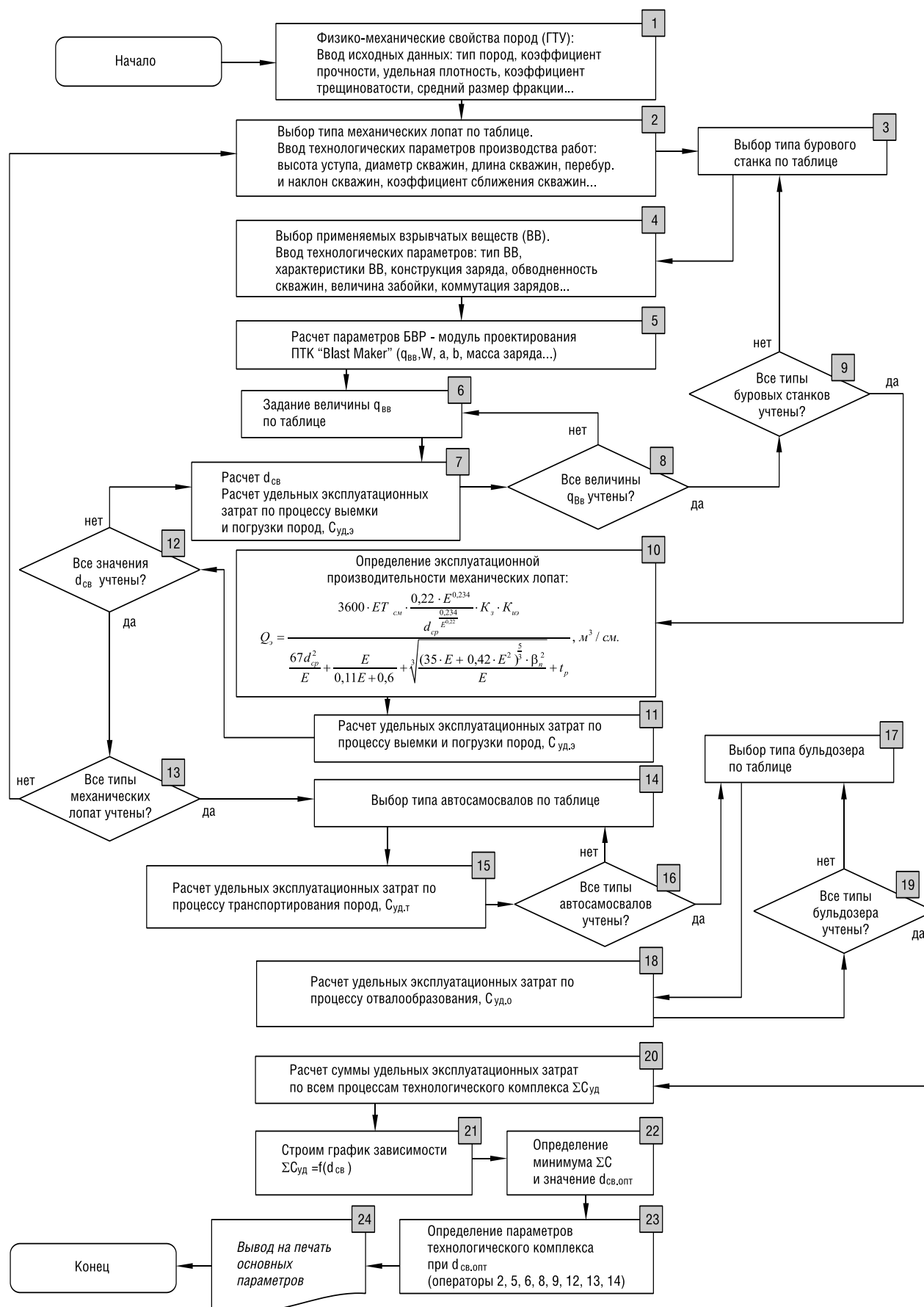


Рис. 7. Укрупненная блок-схема комплексного алгоритма оптимизации параметров ЭАКМЛ путем выбора величины удельного расхода ВВ, типа мехлопаты, автосамосвала, бурового станка и бульдозера

Fig. 7. An enlarged block diagram of a complex algorithm for optimizing the parameters of the EACML by selecting the value of the specific flow rate of explosives, such as a mechanical shovel, dump truck, drilling rig and bulldozer ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Ненашев, А.С. Развитие и состояние применяемых видов технологии ведения горных работ и систем разработки на разрезах Кузбасса / А.С. Ненашев, В.С. Федотенко, Н.А. Федотенко // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. - 2023. - № 3. - С. 249-268.
2. Ненашев, А.С. Организационные условия высокопроизводительной работы мощных экскаваторно-автотранспортных комплексов на разрезах / А.С. Ненашев, В.С. Федотенко // Маркшейдерия и недропользование. - 2019. - № 6(104). - С. 49-52.
3. Колесников, В.Ф. Применение экскаваторов большой производственной мощности на разрезах Кузбасса / В.Ф. Колесников, А.И. Корякин // Вестник КузГТУ. - 2012. - № 4. - С. 24-25.
4. Dindarioo, S.R. Measuring the effectiveness of mining shovels / S.R. Dindarioo, E. Siami-Irdemoosa, S. Frimpong // Mining Engineering. - 2016. - № 68(3). - P. 45-50. - DOI:10.19150/me.6501.
5. Исайченко, А.Б. Оптимизация параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаватором Bucyrus 495HD на разрезе «Тугнуйском» / А.Б. Исайченко // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2015. - № 6. - С. 211-215.
6. Бирюков, А.В. Временная методика расчета параметров взрывной отбойки пород на угольных разрезах / А.В. Бирюков, Н.Я. Репин и др. - М.: Типография ИГД им. А. А. Скочинского, 1976. - 50 с.
7. Репин, Н.Я. Буровзрывные работы на угольных карьерах / Репин Н.Я., Богатырев В.П., Буткин В.Д. и др. - М.: Недра, 1987. - 254 с.
8. Ташкинов, А.С. Сравнительная оценка производительности карьерных экскаваторов при разработке взорванных пород / А.С. Ташкинов, А.А. Сысоев, И.А. Ташкинов // Вестник КузГТУ. - 2009. - №4. - С. 17- 20.
9. Кононенко, Е.А. Влияния кусковатости взорванных пород на производительность экскаватора Bucyrus 495HD / Е.А. Кононенко, А.Б. Исайченко // Маркшейдерия и недропользование. - 2014. - № 6. - С.17-19.
10. Вилкул, Ю.Г. Влияние гранулометрического состава взорванной горной массы на технико-экономические показатели работы карьеров / Ю.Г. Вилкул, В.В. Перегудов // Криворожский технический университет, разработка рудных месторождений. - 2011. - № 94. - С. 3-7.
11. Hai, X. Research on selection and matching of truck-shovel in oversized open-pit mines / X. Hai, L. Funchun, L. Jiangnan, L. Taoying // Applied sciences. - 2023. - № 13 (6). - P. 1-11. - DOI:10.3390/app13063851
12. Казангапов, А.Е. Зависимость производительности экскаватора от кусковатости взорванной породы на Житикаринском карьере / А.Е. Казангапов, А.Е. Куттыбаев, Г. Саменов и др. // Вестник КазНТУ. - 2006. - № 2. - С. 153-156.
13. Боровиков, В.П. Statistica. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов / В.П. Боровиков. - СПб, 2003. - 688 с.
14. Репин, Н.Я. Выемочно-погрузочные работы: Учеб. Пособие / Н.Я. Репин, Л.Н. Репин. - М.: издательство «Горная книга», 2010. - 267 с.
15. Друкованый, М.Ф. Влияние дробления пород на эффективность технологических процессов открытой разработки / М.Ф. Друкованый, Б.Н. Тартаковский и др. - Киев: Наукова думка, 1974. - 271 с.
16. Ржевская, С.В. Исследование разрыхляемости скальных и полускальных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.В. Ржевская. - М.: МГИ, 1979. - 17 с.

REFERENCES

1. 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. 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. Kolesnikov VF, Korjakin AI. The use of excavators of high production capacity in the Kuzbass mines. *Vestnik KuzGTU*. 2012;4: 24-25. (In Russ.).
4. Dindarioo SR, Siami-Irdemoosa E, Frimpong S. Measuring the effectiveness of mining shovels. *Mining Engineering*. 2016;68(3):45-50. DOI:10.19150/me.6501.
5. Isajchenkov AB. Optimization of the parameters of the technology for the development of semi-horizontal overburden by the Bucyrus 495HD excavator at the Tugnuysky section. *Gornyy informacionno-analiticheskij bjulleten'*. 2015;6:211-215. (In Russ.).
6. Birjukov AV, Repin NJa, Panachev IA et al. A temporary method for calculating the parameters of explosive rock stripping at coal mines. - М.: Tipografija IGD im. A. A. Skochinskogo, 1976. - 50 p.
7. Repin NJa, Bogatyrev VP, Butkin VD et al. Drilling and blasting operations at coal pits. - М.: Nedra, 1987. - 254 p.
8. Tashkinov AS, Sysoev AA, Tashkinov IA. Comparative evaluation of the productivity of quarry excavators in the development of blasted rocks. *Vestnik KuzGTU*. 2009;4:17- 20. (In Russ.).
9. 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.).
10. 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.).
11. Hai X, Funchun L, Jiangnan L et al. Research on selection and matching of truck-shovel in oversized open-pit mines. *Applied sciences*. 2023;13(6):1-11. DOI:10.3390/app13063851.
12. Kazangapov AE, Kuttybaev AE, Samenov G et al. Dependence of excavator performance on the lumpiness of the blasted rock at the Zhitikarinsky quarry. *Vestnik KazNTU*. 2006;2:153-156. (In Russ.).
13. Borovikov VP. Statistica. Iskustvo analiza dannyh na komp'yutere: dlja professionalov [Statistica. The art of data analysis on a computer: for professionals]. - SPb, 2003. - 688 p.
14. Repin NJa, Repin LN. Vyemочно-pogruzochnye raboty: Ucheb. Posobie [Excavation and loading operations: A textbook]. - М.: izdatel'stvo «Gornaja kniga», 2010. - 267 p.

15. Drukovanyj MF, Tartakovskij BN, Vishnjakov VS et al. Vlijanie droblenija porod na jeffektivnost' tehnologicheskikh processov otkrytoj razrabotki [The impact of rock crushing on the efficiency of open-pit mining processes]. - Kiev: Naukova dumka, 1974. - 271 p.
16. Rzhetskaja SV. Investigation of the looseness of rocky and semi-rocky rocks: abstract. dis. ... candidate of Technical Sciences. - M.: MGI, 1979. - 17 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Федотенко Виктор Сергеевич:

доктор технических наук,
заместитель директора по научной работе,
заведующий отделом,
ИПКОН РАН,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: victorfedotenko@gmail.com

Чаплыгин Валерий Васильевич:

кандидат технических наук,
доцент,
зав. кафедрой открытых горных работ и электромеханики,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк, Российская Федерация,
e-mail: chief.v.v@yandex.ru

Матвеев Андрей Васильевич:

старший преподаватель,
кафедра открытых горных работ и электромеханики,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
г. Новокузнецк, Российская Федерация,
e-mail: matveev-av@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Fedotenko Viktor Sergeevich:

Doctor of Technical Sciences,
Deputy Director for Scientific Work,
Head of the Department,
IPCON RAS,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: victorfedotenko@gmail.com,
<https://orcid.org/0000-0002-2082-6040>

Chaplygin Valery Vasilyevich:

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Head of the Department of open-pit mining and electromechanics,
Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russian Federation,
e-mail: chief.v.v@yandex.ru

Matveev Andrey Vasilyevich:

Senior Lecturer,
Department of Open-pit Mining and Electromechanics,
Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russian Federation,
e-mail: matveev-av@yandex.ru

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Федотенко В.С. — разработка концепции: формирование идеи, формулировка или развитие ключевых целей и задач / Fedotenko V.S. — concept development: formation of an idea, formulation or development of key goals and objectives

Чаплыгин В.В. — утверждение окончательного варианта: принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и её окончательный вариант / Chaplygin V.V. — approval of the final version: taking responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version

Матвеев А.В. — проведение исследования: проведение экспериментов, сбор данных, анализ и интерпретация полученных данных / Matveev A.V. — conducting research: conducting experiments, collecting data, analyzing and interpreting the data obtained.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.



КАЗАНСКИЙ ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ НЕФТЕГАЗОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Информируем Вас



Подготовка студентов в Институте геологии и нефтегазовых технологий ведется по 2-м направлениям:
05.03.01 Геология и 21.03.01 «Нефтегазовое дело».

Контакты : 420008, Казань, Кремлевская 4/5,
Институт геологии нефтегазовых технологий
Тел/факс: (843) 233-71-61. E-mai: geofak@kpfu.ru

WWW.N-GN.RU