

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ РАЗРАБОТКИ ПОЛУСКАЛЬНЫХ ВСКРЫШНЫХ ПОРОД МЕХЛОПАТАМИ НА РАЗРЕЗАХ КУЗБАССА

В.В. Чаплыгин¹, А.А. Садыков¹, А.В. Матвеев¹

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

Аннотация: Рассмотрена эффективность работы экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат. Основным методом для оценки эффективности работы экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат в условиях конкретного разреза является расчет величины затрат на разработку пород. Критерием, определяющим издержки по каждому процессу и технологии в целом, является величина средне-взвешенного размера кусков взорванных пород. Для реализации этого методического подхода требуется определение производительности мехлопат в зависимости от кусковатости взорванной горной массы. Представлены результаты расчета производительности мехлопат в зависимости от размера куска взорванных пород для мехлопат с вместимостью ковша от 6,3 до 55,8 м³ по всем известным формулам. Построены зависимости производительности от размера куска по различным методикам. Анализ результатов расчета показал, что каждая из методик имеет свою область применения. Значения производительности мехлопаты, рассчитанные для конкретных условий по различным формулам, иногда различаются более чем в два раза. Для оптимизации параметров экскаваторно-автомобильных комплексов требуется разработка универсальной методики расчета производительности мехлопат в зависимости от средневзвешенного размера куска взорванных пород.

Ключевые слова: разрез, механическая лопата, технология разработки, оптимизация параметров, производительность экскаватора, кусковатость взорванных горных пород, коэффициент экскавации, экскаваторно-автомобильный комплекс, Кузбасс.

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

Optimization of parameters of semi-hard overburden excavation by power shovels in open pit mines in Kuzbass

V.V. Chaplygin¹, A.A. Sadykov¹, A.V. Matveev¹

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

Abstract: The article focuses on the efficiency of the truck-and-power shovel system. The main method of the truck-and-power shovel system efficiency evaluation in terms of a specific open pit mine is the cost estimating of mining. The cost estimating criterion per an individual process and a technology as a whole is the weighted average of the size in blasted rock fragmentation. Implementation of this method requires determining the power shovel capacity as function of fragment size in blasted rock mass. This article presents the calculated data on power shovel capacity as function of fragment size in blasted rock mass as a case-study of power shovels with bucket capacity from 6.3 to 55.8 m³ using all known formulas. The capacity–fragment size curves are plotted using different procedures. The calculation analysis shows that each procedure has its own range of use. The values of the power shovel capacity calculated from different formulas sometimes differ more than two times. Optimization of the truck-and-power shovel system parameters requires a universal and generalized procedure for calculating power shovel capacity as function of the weighted-average size in blasted rock fragmentation.

Key words: open pit mine, power shovel, mining technology, parameter optimization, shovel capacity, blasted rock fragmentation, excavation factor, truck-and-shovel system, Kuzbass.

For citation: Chaplygin V. V., Sadykov A. A., Matveev A. V. Optimization of parameters of semi-hard overburden excavation by power shovels in open pit mines in Kuzbass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(9):84–98. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_84.

Введение

Задача оптимизации параметров процессов открытых горных работ для применяемых технических средств с учетом физико-механических свойств разрабатываемых пород и организации работы являлась предметом исследования многих представителей научных школ академиков РАН Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, К.Н. Трубецкого, В.Н. Захарова и их учеников.

Анализ результатов научных исследований по вопросам технико-экономической оценки эксплуатации экскаваторно-автомобильных комплексов с применением мехлопат (ЭАКМЛ), обоснования рационального удельного расхода взрывчатых веществ (ВВ) и параметров буровзрывных работ (БВР), расчета параметров смежных процессов с учетом их взаимного влияния показал, что задача оптимизации параметров данной технологии решалась только в ряде случаев, когда для экскаватора циклического действия удавалось установить зависимость

изменения величины годовой производительности от кусковатости взорванной горной массы. На основании этой зависимости, учитывающей физико-механические свойства разрабатываемых пород и организацию работы, было несложно определить изменение удельных затрат на экскавацию и на все основные процессы технологии разработки пород ЭАКМЛ как функцию величины средневзвешенного размера куска взорванных пород. В результате путем построения графической зависимости изменения суммарных затрат на разработку полускальных пород экскаватором-мехлопаты с последующим транспортированием их автосамосвалами и укладкой в бульдозерный отвал от величины средневзвешенного размера кусков взорванных пород для условий конкретного разреза устанавливается зона минимальных значений издержек, которая определяет оптимальную величину средневзвешенного размера кусков взорванных пород ($d_{св}$). Это значение $d_{св}$, с учетом изменения горнотех-

нических условий (прочностных свойств пород, типа ВВ при обводненности блока, увеличения расстояния транспортирования вскрышных пород до отвала и т.п.) и других экономических факторов (стоимости дизельного топлива, ВВ, СВ, заработной платы, тарифов на электроэнергию и т.п.), позволяет установить издержки по каждому из основных процессов технологии разработки пород экскаваторно-автомобильным комплексом.

Таким образом, достигалась оптимизация параметров ЭАКМЛ разреза, которая заключалась в определении минимума суммарных удельных затрат на разработку полускальных вскрышных пород только при применении этого типа механической лопаты (конечно, с учетом параметров каждого из процессов, физико-механических свойств разрабатываемых пород, при обеспечении безопасных условий эксплуатации).

Отмечается [1], что при разработке рекомендаций и оценке экономической эффективности производства взрывных работ на карьерах важным фактором является знание того, как изменяется производительность экскаваторов под влиянием кусковатости взорванных пород, следовательно, актуальной задачей для исследований является анализ гранулометрического состава горных пород.

На добычных и вскрышных блоках золоторудных карьеров АО «Полюс Вернинское» показано влияние гранулометрического состава взорванных руд и пород на производительность выемочно-погрузочного оборудования карьеров [2].

Возникает вопрос, каким образом можно сравнивать эффективность применения ЭАКМЛ в определенных условиях разреза, но при работе экскаватора другой модификации? Для этого экскаватора опять следует установить новую зависимость изменения величины годовой производительности от кусковатости взорванной горной массы или применить

известную, но тогда нужны пределы — диапазон использования, которые авторы практически никогда не дают.

Авторами [3] при проведении оптимизации проекта ведения взрывных работ было обнаружено значительное увеличение эффективной производительности погрузочного оборудования: 7% для экскаваторов РС4000 и 2% для РС5500.

Кроме того, в настоящее время не представляется возможным осуществить сравнение эффективности применения ЭАКМЛ на стадии выбора типа механической лопаты для конкретных горнотехнических условий разреза, причем, с перспективой сопоставления возможностей разных модификаций автосамосвалов, вышеизложенное позволяет считать исследования в данном направлении актуальной научной задачей.

Объектом исследований является технология разработки в условиях Кузбасса полускальных вскрышных пород экскаваторами-механическими лопатами с последующим их транспортированием автосамосвалами и укладкой в бульдозерный отвал.

На данном этапе предметом исследований и основной задачей является сравнение результатов расчета по известным зависимостям изменения производительности экскаваторов-мехлопат от кусковатости взорванной горной массы.

Конечная цель исследований — обоснование параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород на разрезах Кузбасса экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат (ЭАКМЛ), обеспечивающих оптимальные условия их эксплуатации на основании сопоставления в горнотехнических условиях разреза различных типов экскаваторного и автотранспортного оборудования.

Идея работы заключается в том, что построением графической зависимости изменения удельных затрат на разработ-

ку вскрыши по процессам исследуемой технологии (подготовка пород к выемке — БВР, выемка и погрузка — экскавация, транспортирование и отвалообразование) от величины средневзвешенного размера кусков взорванной вскрышной породы ($d_{св}$) могут быть определены суммарные издержки по технологии, а зона их минимума (диапазон $d_{св}$) определяет рациональные параметры каждого из процессов и технологии в целом.

На первом этапе исследований ставится задача произвести анализ существующих зависимостей, известных формул для расчета величины производительности механической лопаты от кусковатости взорванной горной массы, сравнить результаты расчета и определить диапазон использования каждой из них в условиях угольных разрезов Кузбасса.

В работе [4] отмечается, что электрические экскаваторы являются доминирующим погрузочным оборудованием при добыче полезных ископаемых открытым способом. Авторами предлагается введение стохастического показателя эффективности работы лопат с целью количественной оценки этой эффективности.

ОАО УК «Кузбассразрезуголь», расположенная в Кузбассе, занимается добычей угля открытым способом на шести угольных разрезах. Ежегодная добыча составляет свыше 45 млн т угля, из которых около 50% экспортируется за рубеж. Балансовые запасы компании — 2 млрд т.

На разрезах ОАО УК «Кузбассразрезуголь» используется высокопроизводительное выемочно-погрузочное и транспортное оборудование, например, американские экскаваторы P&H-4100 с вместимостью ковша 56 м³. Один эксплуатируется с 2009 г. на Талдинском разрезе, второй — с 2011 г. на Бачатском разрезе. Также на разрезах компании используются экскаваторы P&H-2300 и

P&H-2800 того же производителя, которые хорошо себя зарекомендовали [5].

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 °С, а капитальный ремонт планируется 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.

На разрезе «Тугнуйский» АО «СУЭК» известны рекорды экскаватора Bucyrus 495HD с вместимостью ковша 41,3 м³ при разработке вскрышных пород [6]. В комплексе с ним работают автосамосвалы грузоподъемностью 220 т, в которые осуществляется погрузка взорванных полускальных вскрышных пород. Достигнуты высокие показатели производительности данного экскаватора с коэффициентом использования календарного времени 0,81, в 2014 г. средняя месячная производительность составила 1,4 млн м³, а максимальная — 2 млн м³. В свою очередь, величина удельного расхода взрывчатых веществ — 0,88 кг/м³, что выше значения расхода ВВ в похожих горнотехнических условиях для экскаваторов с меньшим размером ковша (0,55 — 0,7 кг/м³) [7].

Существует вопрос о том, нужно ли повышать уровень буровзрывного дробления пород для увеличения эффективности работы современных механических лопат, вместимости ковша которых превышает 20 м³. Каков оптимальный расход ВВ в этом случае?

Некоторые примеры производственных условий показывают, что исключение пересмотра установленных норматив-

вов может привести к снижению производительности (экскаватор P&H-2800 на Бачатском разрезе обеспечивает производительность 800 тыс. м³/мес вместо 1000 тыс. м³/мес, что приводит к потере производительности в 20% [8]).

Для снижения затрат на буровзрывную подготовку и выемку горной массы рекомендуется улучшать качество буровзрывной подготовки [8]. Однако предлагаемая зависимость для определения удельного расхода ВВ довольно сложна в использовании и не учитывает экономических аспектов.

Методы

В исследовании [9] рассматриваются временные потери при расчете производительности карьерных экскаваторов. В предлагаемом способе измерения производительности экскаваторов в качестве одного из показателей приводится временная производительность, которая учитывает факторы доступности и возможности их использования.

Мы считаем, что причиной потери производительности механических лопат больших единичных мощностей может быть стопорный режим работы [10]. Он проявляется в нерешительности машинистов использовать максимальную силу при наборе ковша, чтобы не повредить дорогостоящее оборудование. Машинисты загружают породу лишь частично, чтобы избежать возможных поломок. Такие опасения машинистов могут быть обоснованы тем, что у современных экскаваторов с большой единичной мощностью соотношение собственной массы и кубометра вместимости ковша значительно ниже, чем у машин с емкостью ковша менее 20 м³ [8, 10].

В настоящее время известны следующие пути повышения производительности одноковшовых экскаваторов:

- совершенствование рабочего процесса одноковшового экскаватора;

- совершенствование конструкции экскаватора;
- улучшение эргономических показателей [11].

Одним из факторов, влияющих на работоспособность карьерных экскаваторов циклического действия, является качество подготовки забоя и горной массы [12].

В статье [13] проводится исследование времени работы экскаваторов в разрезе с экспериментальными взрывами горных пород для оценки влияния различных факторов на производительность экскаватора. Основываясь на полученных данных, авторы применили методы множественной регрессии и искусственной нейронной сети для разработки различных моделей для прогнозирования времени цикла.

Анализ методологической базы для оптимизации параметров работы экскаваторно-автомобильного комплекса показывает, что она основана на формулах, которые связывают такие параметры, как коэффициент экскавации (K_3), время цикла ($t_{ц}$) и производительность экскаватора, с размерностью ковша (E) и размером кусков взорванной породы ($d_{св}$) [14, 15].

Расчет производительности экскаваторов основывается на опыте работы мехлопат ЭКГ-4,6 и ЭКГ-8И и эмпирических формулах.

Коэффициент экскавации

$$K_3 = \frac{K_H}{K_P} = \frac{1,18 \cdot 5^{\frac{6,5 \cdot d_{св}^2}{E^{1,2}}}}{0,75 \cdot \sqrt[3]{E^2} e^{\frac{1 - \frac{d_{св}^2}{0,56 \cdot \sqrt[3]{E^2}}}{1,35}}} \quad (1)$$

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

Длительность экскаваторного цикла

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

где β_n – угол поворота экскаватора, град.

Техническая производительность экскаватора $Q_{\text{экс}}$, м³/ч:

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

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 с увеличением 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 [14, 15].

В работе [10] авторы разработали упрощенные формулы для математической обработки зависимостей (1), (2) и (3).

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

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{ч}} + t_n + t_p, \quad (4)$$

где $t_{\text{ч}}$ – время черпания, с; t_n – суммарная продолжительность поворотных операций к месту разгрузки и обратно в забой, с; t_p – время разгрузки, с.

$$t_{\text{ч}} = \frac{67d_{\text{cp}}^2}{E} + \frac{E}{0,11E + 0,6}, \text{ с}, \quad (5)$$

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

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

где β_n – угол поворота экскаватора, град.

$$K_{\text{э}} = 0,83 \exp \left(-2 \frac{d_{\text{cp}}^5}{E^{0,2}} \right). \quad (7)$$

Техническая производительность экскаватора

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

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 влияния на производительность экскаватора кусковатости взорванных пород является сложной задачей. В связи с этим результаты исследований экскаватора Висугус 495HD с ковшем вместимостью 41,3 м³, полученные при работе в разрезе «Тугнуйский», заслуживают внимания [16].

Вес породы в ковше

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

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

Время цикла экскаватора

$$t_u = t_n + 17,94 = 9 \cdot e^{0,7D_{св}} + 17,94, \text{ с}. \quad (10)$$

Годовая производительность экскаватора

$$Q_{э\text{зод}} = \frac{3600 \cdot G \cdot T_{см} \cdot n_{см} \cdot n_{год} \cdot K_{из} \cdot K_{изг}}{T_u} =$$

$$= \frac{\left[3600 \cdot \left(\frac{56,65}{D_{св}^{0,287}} \right) \cdot T_{см} \cdot n_{см} \cdot n_{год} \cdot K_{из} \cdot K_{изг} \right]}{\left(9 \cdot e^{0,7D_{св}} + 17,94 \right)}, \text{ т/год}, \quad (11)$$

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; $K_{изг}$ – коэффициент использования рабочего времени экскаватором в течение года.

Ю.Г. Вилкул и В.В. Перегудов [17] по результатам исследования экскаватора ЭКГ-8И предлагают следующую формулу для расчета сменной производительности:

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

где $V_{тр}$ – объем, перевозимый одним автосамосвалом, м³; $T_{см}$ – время смены экскаватора, ч; $K_{ио}$ – 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; $t_{пов1}$, $t_{пов2}$ – 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, кото-

рые необходимо убрать в течение смены, и время на разборку негабарита в течение смены. Методически неверно связывать производительность 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 [18] отмечается важность согласования типов экскаватора и автосамосвала, особенно на крупных предприятиях.

А.Е. Казагаповым, А.Е. Куттыбаевым, Г. Саменовым, А.Н. Петрунко в работе [19] описывается определение производительности для экскаваторов ЭКГ-6,3УС и ЭКГ-8И:

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

где t_u — продолжительность цикла экскавации, с; E — вместимость ковша экскаватора, м^3 ; t_n — продолжительность извлечения и откидки одного негабаритного куска, с; $p'(x_7)$ — выход негабаритных кусков, %; V_n — средний объем негабаритного куска, м^3 ; $k_{нк}$ — коэффициент наполнения ковша; $k_{рк}$ — коэффициент разрыхления породы в ковше.

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

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, %; $p'(x_6)$ — гра-

нулометрический состав группы фракций > 1,2 м, %.

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

где Q_{mp} — 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, а также разработки методики расчета выхода негабаритных кусков для конкретного типа мехлопаты.

Результаты

На основе расчетов для мехлопат с ковшами 6,3; 8; 10; 12; 15; 18; 25; 33; 41,3; 55,8 м^3 были построены графические зависимости сменной производительности экскаватора от диаметра куска взорванной массы.

В качестве примера на рис. 1–6 приведены графические зависимости для мехлопат с ковшами 6,3; 10; 18; 33; 41,3; 55,8 м^3 , где представлены результаты расчета по формулам, разработанным Н.Я. Репиным; Ю.Г. Вилкулом и В.В. Перегудовым; А.А. Сысоевым и А.Б. Исайченковым (для $E = 41,3 \text{ м}^3$).

С целью сравнения расчетных формул и закономерности изменения производительности мехлопат в зависимости от значений средневзвешенного куска

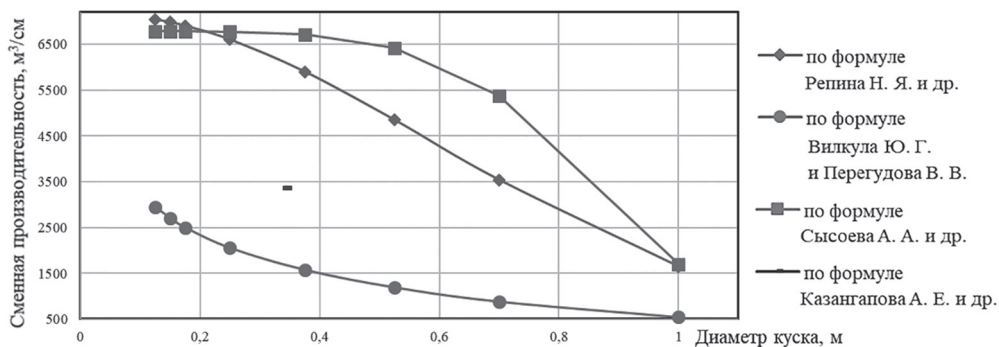


Рис. 1. Зависимость производительности экскаватора с ковшом 6,3 м³ от размера куска по различным методикам

Fig. 1. Dependence of the performance of an excavator with a bucket of 6,3 m³ on the size of the piece according to various methods

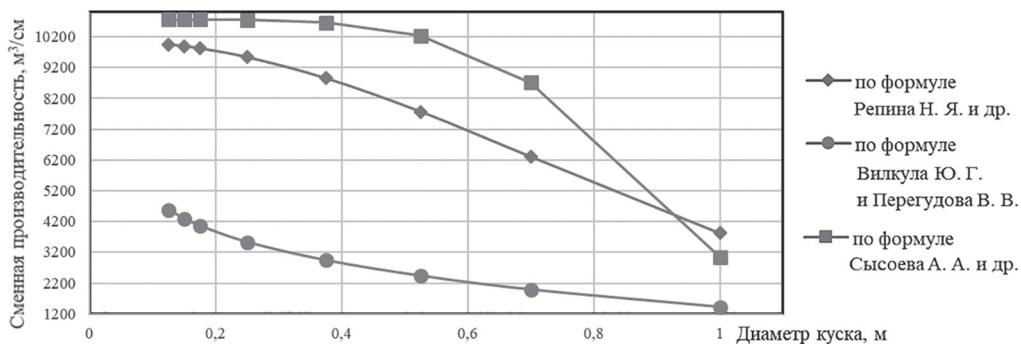


Рис. 2. Зависимость производительности экскаватора с ковшом 10 м³ от размера куска по различным методикам

Fig. 2. Dependence of the performance of an excavator with a bucket of 10 m³ on the size of the piece according to various methods

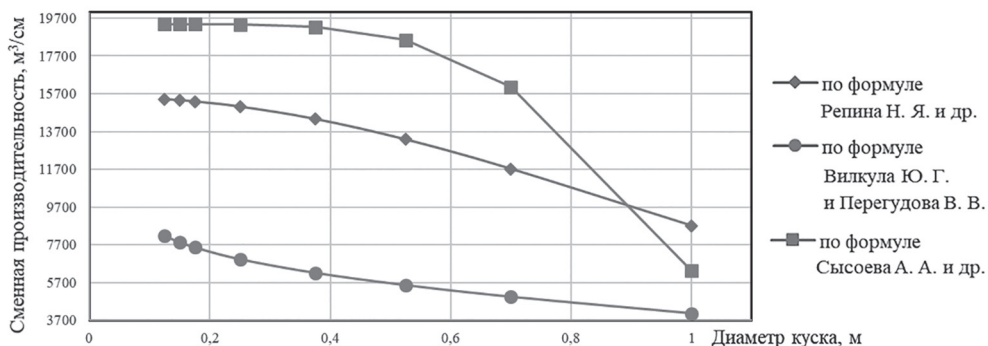


Рис. 3. Зависимость производительности экскаватора с ковшом 18 м³ от размера куска по различным методикам

Fig. 3. Dependence of the performance of an excavator with a bucket of 18 m³ on the size of the piece according to various methods

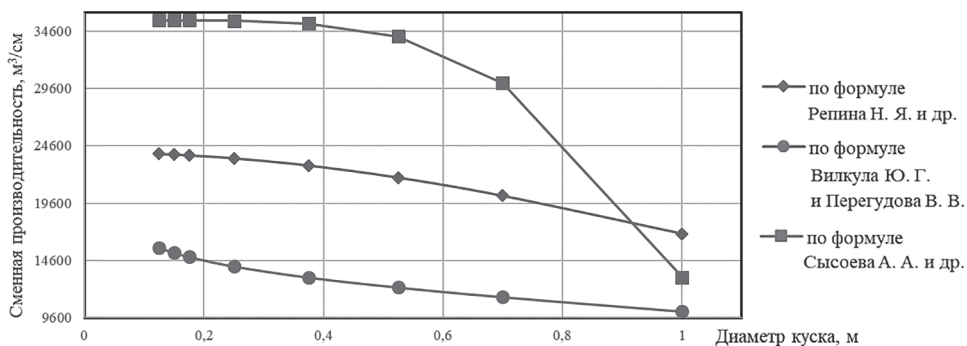


Рис. 4. Зависимость производительности экскаватора с ковшом 33 м³ от размера куска по различным методикам

Fig. 4. Dependence of the performance of an excavator with a bucket of 33 m³ on the size of the piece according to various methods

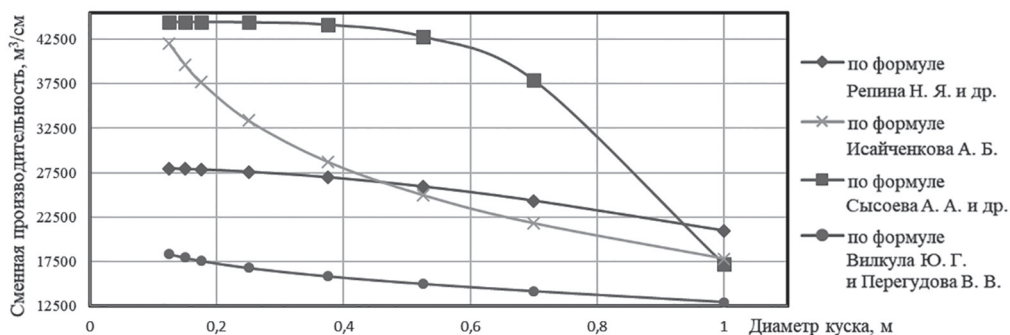


Рис. 5. Зависимость производительности экскаватора с ковшом 41,3 м³ от размера куска по различным методикам

Fig. 5. Dependence of the performance of an excavator with a bucket of 41,3 m³ on the size of the piece according to various methods

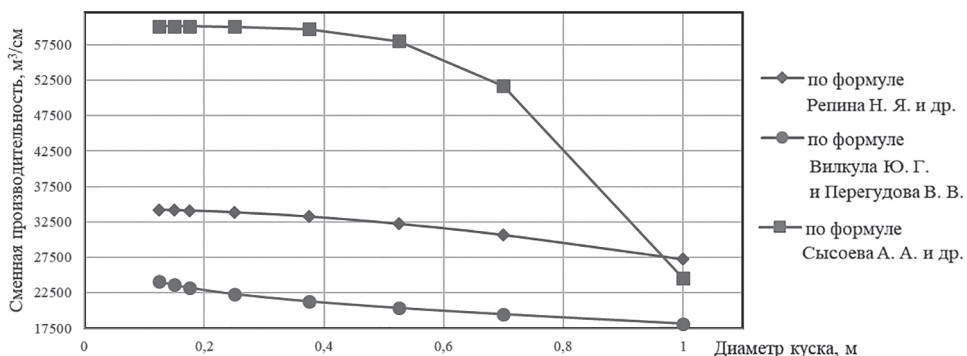


Рис. 6. Зависимость производительности экскаватора с ковшом 55,8 м³ от размера куска по различным методикам

Fig. 6. Dependence of the performance of an excavator with a bucket of 55,8 m³ on the size of the piece according to various methods

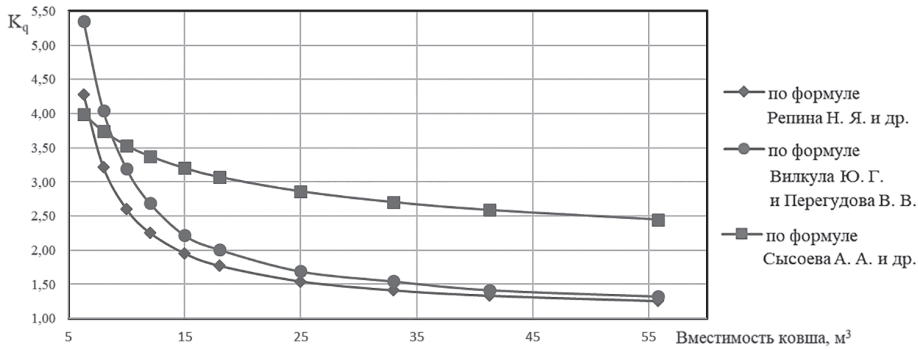


Рис. 7. Графики изменения величины коэффициента $K_Q = f \frac{Q_{см.макс}}{Q_{см.мин}}$ от вместимости ковша экскаватора

Fig. 7. Graphs of the change in value of coefficient $K_Q = f \frac{Q_{max}}{Q_{min}}$ from the capacity of excavator bucket

взорванной породы и вместимости ковша были построены графики изменения величины коэффициента $K_Q = f \frac{Q_{см.макс}}{Q_{см.мин}}$ от вместимости ковша (рис. 7).

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

Значительное отличие графика

$$K_Q = f \frac{Q_{см.макс}}{Q_{см.мин}}$$

по формуле А.А. Сысоева

подтверждает необходимость исключения результатов расчета по ней при сравнении формул статистически.

Нас интересует, являются ли рассчитанные по формуле Н.Я. Репина и по формуле Ю.Г. Вилкула 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. В настоящее время для решения многих практических задач

широко применяется выбор информативных признаков с помощью критериев Фишерского типа [20].

Критерий Фишера (F) предполагает вычисление средних значений и дисперсий в сравниваемых выборках. Его применение целесообразно в тех случаях, когда возникают сомнения в достоверности различий.

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

Обсуждение результатов

Первое, что можно отметить при сравнении полученных графических зависимостей, это значительное различие за-

висимости сменной производительности экскаватора от диаметра 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 Н.Я. Репина 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.

Числовые значения производительности, установленные по формулам Н.Я. Репина и А.А. Сысоева, очень близки. Это, в принципе, объясняется тем, что А.А. Сысоев, как было уже сказано выше, фактически произвел только математическую обработку известной зависимости, установленной Н.Я. Репиным [10]. Однако после значений средневзвешенного куска взорванной породы более 0,7 мм расчетная величина производительности по формуле А.А. Сысоева резко уменьшается. Стоит заметить, что чем больше вместимость ковша экскаватора, тем больше становится эта разница. Учиты-

вая вышесказанное, при сравнении формул статистически, с целью исключения возможного искажения фактически двойного учета в анализе идентичных закономерностей (Н.Я. Репина и А.А. Сысоева), следует учитывать только одну из них — формулу Н.Я. Репина.

Заключение

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 Кузбасса. Поэтому следующая задача для достижения главной цели исследований — обоснование параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород на разрезах Кузбасса экскаваторно-автомобильными комплексами с применением мехлопат (ЭАКМЛ), обеспечивающих оптимальные условия их эксплуатации на основании сопоставления в горнотехнических условиях разреза различных типов экскаваторного и автотранспортного оборудования — требует разработки универсальной методики для расчета производительности мехлопат в зависимости от средневзвешенного размера куска взорванных пород и проверки результатов расчета на основании фактических данных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сермин Д. С., Матвеев А. В., Лобанова О. О. Анализ качества взорванных горных пород на основе интегрального распределения энергии / Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: Сборник трудов конференции. — Новокузнецк: СибГИУ, 2020. — С. 210–212.
2. Якимов А. А., Ахетов П. В. Оценка влияния гранулометрического состава взорванной горной массы на производительность экскаваторов / Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов, т. 3. — Чита: ЗабГУ, 2021. — С. 75–79.
3. Лопеш Г. С., де Оливейра Д. Б. М., Корсини Ж. С., Гарсия А. М., де Карвалью Л. Ф. Анализ вибрационных данных для оптимизации проекта ведения взрывных работ и по-

вышения производительности экскаваторов // Взрывное дело. — 2020. — № 127-84. — С. 171—191.

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

5. Колесников В. Ф., Корякин А. И. Применение экскаваторов большой производственной мощности на разрезах Кузбасса // *Вестник КузГТУ*. — 2012. — № 4. — С. 24—25.

6. Ясученя С. В., Опанасенко П. И., Кулецкий В. Н., Каинов А. И., Попов Д. В. Рекорды как способ выявления и освоения потенциальных возможностей экскаваторно-автомобильного комплекса // *Уголь*. — 2013. — № 8 (1049). — С. 19—21.

7. Исайченков А. Б. Оптимизация параметров технологии разработки полускальных вскрышных пород экскаватором Висургус 495HD на разрезе «Тугнуйский» // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2015. — № 6. — С. 211—215.

8. Федотенко В. С., Ташкинов И. А., Ташкинов А. С., Федотенко С. М. Патент РФ № 2563894 F42D1/08, 27.09.2015. Способ определения рационального удельного расхода взрывчатого вещества.

9. Yadav P. K., Kumar D., Gupta S. Performance analysis of mining shovels — a case study // *International Conference on Technological Innovation in Mechanical Engineering (TIME-2021)*. ShardaUniversity, Noida, 2021.

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

11. Лещинский А. В., Шевкун Е. Б., Вершинина А. Р., Белозеров И. Н. Выбор пути повышения производительности карьерного экскаватора // *Маркшейдерия и недропользование*. — 2021. — № 1 (111). — С. 40—45.

12. Шибанов Д. А., Иванова П. В., Иванов С. Л. Тарификация влияющих факторов на работу современных карьерных экскаваторов по себестоимости экскавации горной массы // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. — 2015. — № S1-2. — С. 24—33.

13. Dey S., Manda S. K., Bhar C. Application of MR and ANN in the prediction of the shovel cycle time, thereby improving the performance of the shovel-dumper operation. A case study // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2022, vol. 122, no. 10, pp. 597—606. DOI: 10.17159/2411-9717/1075/2022.

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

15. Репин Н. Я., Богатырев В. П., Буткин В. Д. и др. Буровзрывные работы на угольных карьерах. — М.: Недра, 1987. — 254 с.

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

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

18. Hai X., Funchun L., Jiangnan L., Taoying L. Research on selection and matching of truck-shovel in oversized open-pit mines // *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 6, article 3851. DOI: 10.3390/app13063851.

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

20. Фазылов Ш. Х., Маматов Н. С. Особенности критериев информативности Фишера // *Проблемы вычислительной и прикладной математики*. — 2017. — № 4(10). — С. 110—118. **ПИАБ**

REFERENCES

1. Sermin D. S., Matveev A. V., Lobanova O. O. Analysis of the quality of blasted rocks based on the integral energy distribution. *Nauka i molodezh': problemy, poiski, resheniya: Sbornik trudov konferentsii* [Science and youth: problems, searches, solutions: Proceedings of conference], Novokuznetsk, SibGIU, 2020, pp. 210–212. [In Russ].
2. Yakimov A. A., Ahetov P. V. Assessment of the impact of the granulometric composition of the exploded rock mass on the performance of excavators. *Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov*, t. 3 [Kulagin readings: techniques and technologies of production processes, vol. 3], Chita, ZabGU, 2021, pp. 75–79. [In Russ].
3. Lopesh G. S., de Oliveyra D. B. M., Korsini Zh. S., Garsiya A. M., de Karval'yu L. F. Analysis of vibration data to optimize the blasting project and increase the productivity of excavators. *Explosion technology*. 2020, no. 127-84, pp. 171–191. [In Russ].
4. Dindarioo S. R., Siami-Irdemoosa E., Frimpong S. Measuring the effectiveness of mining shovels. *Mining Engineering*. 2016, vol. 68, no. 3, pp. 45–50. DOI: 10.19150/me.6501.
5. Kolesnikov V. F., Korjakin A. I. T The use of excavators of large production capacity in the Kuzbass sections. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2012, no. 4, pp. 24–25. [In Russ].
6. Yasyuchenya S. V., Opanasenko P. I., Kuletskiy V. N., Kainov A. I., Popov D. V. Records as a way to identify and master the potential capabilities of the excavator-automotive complex. *Ugol'*. 2013, no. 8 (1049), pp. 19–21. [In Russ].
7. Isaychenkov A. B. Optimization of the parameters of the technology for the development of semi-horizontal overburden rocks by the Bucyrus 495HD excavator at the Tugnuisky section. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. 6, pp. 211–215. [In Russ].
8. Fedotenko V. S., Tashkinov I. A., Tashkinov A. S., Fedotenko S. M. *Patent RU 2563894 F42D1/08*, 27.09.2015. [In Russ].
9. Yadav P. K., Kumar D., Gupta S. Performance analysis of mining shovels – a case study. *International Conference on Technological Innovation in Mechanical Engineering (TIME-2021)*. ShardaUniversity, Noida, 2021.
10. Tashkinov A. S., Sysoev A. A., Tashkinov I. A. Comparative evaluation of the productivity of quarry excavators in the development of blasted rocks. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2009, no. 4, pp. 17–20. [In Russ].
11. Leshchinskiy A. V., Shevkun E. B., Vershinina A. R., Belozеров I. N. Choosing a way to increase the productivity of a quarry excavator. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2021, no. 1 (111), pp. 40–45. [In Russ].
12. Shibanov D. A., Ivanova P. V., Ivanov S. L. Pricing of influencing factors on the operation of modern quarry excavators at the cost of excavating rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no. S1-2, pp. 24–33. [In Russ].
13. Dey S., Manda S. K., Bhar C. Application of MR and ANN in the prediction of the shovel cycle time, thereby improving the performance of the shovel-dumper operation. A case study. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2022, vol. 122, no. 10, pp. 597–606. DOI: 10.17159/2411-9717/1075/2022.
14. Biryukov A. V., Repin N. Ya. Panachev I. A., Tashkinov A. S. *Vremennaya metodika rascheta parametrov vzryvnoy otboyki porod na ugol'nykh razrezakh* [A temporary method for calculating the parameters of explosive rock breaking at coal mines], Moscow, Tipografiya IGD im. A.A. Skochinskogo, 1976, 50 p.
15. Repin N. Ya., Bogatyrev V. P., Butkin V. D., etc. *Burovzryvnye raboty na ugol'nykh kar'erakh* [Drilling and blasting operations at coal pits], Moscow, Nedra, 1987, 254 p.
16. Kononenko E. A., Isaychenkov A. B. The impact of the lumpiness of the blasted rocks on the performance of the Bucyrus 495HD excavator. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2014, no. 6, pp. 17–19. [In Russ].

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

18. Hai X., Funchun L., Jiangnan L., Taoying L. Research on selection and matching of truck-shovel in oversized open-pit mines. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 6, article 3851. DOI: 10.3390/app13063851.

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

20. Fazylov Sh. Kh., Mamatov N. S. Features of Fischer's informative criteria. *Problemy vychislitel'noy i prikladnoy matematiki*. 2017, no. 4(10), pp. 110–118. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чаплыгин Валерий Васильевич¹ — канд. техн. наук,
доцент, зав. кафедрой,

e-mail: chief.v.v@yandex.ru,

Садыков Артур Алексович¹ — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: artur.aleksovich@gmail.com,

Матвеев Андрей Васильевич¹ — старший
преподаватель, e-mail: matveev-av@yandex.ru,

¹ Сибирский государственный индустриальный университет.

Для контактов: Садыков А.А., e-mail: artur.aleksovich@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.V. Chaplygin¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor, Head of Chair,

e-mail: chief.v.v@yandex.ru,

A.A. Sadykov¹, Cand. Sci. (Eng.),

Assistant Professor,

e-mail: artur.aleksovich@gmail.com,

A.V. Matveev¹, Senior Lecturer,

e-mail: matveev-av@yandex.ru,

¹ Siberian State Industrial University,

654007, Novokuznetsk, Russia.

Corresponding author: A.A. Sadykov, e-mail: artur.aleksovich@gmail.com.

Получена редакцией 17.05.2023; получена после рецензии 14.06.2023; принята к печати 10.08.2023.

Received by the editors 17.05.2023; received after the review 14.06.2023; accepted for printing 10.08.2023.

