

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.1

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-4-30-43

О ВЛИЯНИИ ГРАНУЛОМЕТРИИ ВЗОРВАННОЙ ГОРНОЙ МАССЫ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В РАБОЧЕМ ОБОРУДОВАНИИ КАРЬЕРНОГО ЭКСКАВАТОРА

Великанов В.С.^{1,2}, Чернухин С.А.^{1,2}, Тельминов Н.С.¹, Дремин А.В.³, Ломовцева Н.В.⁴, Ситдикова С.В.²

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

³ООО «ДАВТЕХ», Екатеринбург, Россия

⁴Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Известно, что гранулометрический состав горных пород используется на горнодобывающих предприятиях в качестве одного из основных показателей для оценки эффективности взрывных работ. Контролируя процесс взрывных работ и генерируя оптимальное распределение по размерам кусков в развале, возможно частично оптимизировать экономические показатели горнодобывающего предприятия. В работе решается задача по установлению степени влияния гранулометрического состава взорванной горной массы при отработке месторождений открытым способом на распределение напряжений в рабочем оборудовании карьерного экскаватора. **Цель работы.** Анализ простоев парка карьерных экскаваторов на горнодобывающих предприятиях Уральского федерального округа выявил, что значительная доля простоев обусловлена выходом из строя металлоконструкций. Основное влияние на появление и развитие трещин в металлоконструкциях оказывают циклические нагрузки, возникающие при экскавации неоднородной взорванной горной массы. Изучение возможностей контроля гранулометрического состава взорванной горной массы позволит определить параметры буровзрывных работ, требующие корректировки для повышения эффективности при взрыве следующего блока. **Используемые методы.** При решении поставленных задач использовался комплексный подход, включающий системный научный анализ и обобщение ранее опубликованных исследований. Для оценки напряженно-деформированного состояния элементов несущих металлоконструкций карьерных экскаваторов применялся метод конечных элементов. **Новизна.** Использование современных цифровых технологий на базе машинного обучения для определения гранулометрического состава взорванной горной массы позволяют выявить зависимость влияния однородности грансостава в забое на износ рабочего органа экскаватора. **Результат.** Используя в качестве аппаратно-программного сопровождения экспериментальных исследований отечественное оборудование компании «Давтех», определены параметры кусковатости взорванной горной массы. Установлено влияние направления внешней нагрузки и показателей кусковатости развала на напряженно-деформированное состояние ковша карьерного экскаватора. **Практическая значимость.** Полученные в ходе исследования данные позволяют разработать рекомендации по оптимизации режимов управления карьерным экскаватором, что в итоге позволит снизить количество отказов рабочего оборудования и увеличит его ресурс.

Ключевые слова: экскаватор, полезное ископаемое, рабочее оборудование, ковш, распределение напряжений

© Великанов В.С., Чернухин С.А., Тельминов Н.С., Дремин А.В., Ломовцева Н.В., Ситдикова С.В., 2024

Для цитирования

О влиянии гранулометрии взорванной горной массы на распределение напряжений в рабочем оборудовании карьерного экскаватора / Великанов В.С., Чернухин С.А., Тельминов Н.С., Дремин А.В., Ломовцева Н.В., Ситдикова С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №4. С. 30-43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-30-43>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ON THE INFLUENCE OF THE GRANULOMETRY OF BLASTED ROCK MASS ON THE STRESS DISTRIBUTION IN THE WORKING EQUIPMENT OF A QUARRY EXCAVATOR

Velikanov V.S.^{1,2}, Chernukhin S.A.^{1,2}, Telminov N. S.¹, Dremine A.V.³, Lomovtseva N.V.⁴, Sitdikova S.V.²

¹Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

²Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

³LLC DAVTECH, Yekaterinburg, Russia

⁴Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). The granulometric composition of rock is used at mining enterprises as one of the main indicators for assessing the efficiency of blasting operations. By controlling the blasting process and generating an optimal size distribution of fragments in the muck pile, it is possible to partially optimize the economic performance of the mining enterprise. This study addresses the task of determining the extent to which the granulometric composition of blasted rock mass during open-pit mining influences the stress distribution in the working equipment of a quarry excavator. **Objectives.** An analysis of the downtime of quarry excavator fleets at mining enterprises in the Ural Federal District revealed that a significant portion of downtime is due to the failure of metal structures. The primary influence on the appearance and development of cracks in metal structures is exerted by cyclic loads that arise during the excavation of heterogeneous blasted rock mass. Studying the possibilities of controlling the granulometric composition of blasted rock mass will allow the determination of drilling and blasting parameters that require adjustment to enhance the efficiency of blasting the next block. **Methods Applied.** To address the tasks set, a comprehensive approach was used, including a systematic scientific analysis and synthesis of previously published research. The finite element method was applied to assess the stress-strain state of the load-bearing metal structures of quarry excavators. **Originality.** The use of modern digital technologies based on machine learning to determine the granulometric composition of blasted rock mass allows for identifying influence dependency between the homogeneity of the granulometric composition in the muck pile and the wear of the excavator's working tool. **Result.** Using domestic equipment from the company Davtech for the hardware and software support of experimental research, the parameters of the granulometric composition of the blasted rock mass were determined. The influence of the direction of the external load and the indicators of the granulometric composition of the muck pile on the stress-strain state of the quarry excavator dipper was established. **Practical Relevance.** The data obtained in the course of the research will enable the development of recommendations for optimizing the operating modes of the quarry excavator, which will ultimately reduce the number of equipment failures and increase its lifespan.

Keywords: excavator, mineral, working equipment, shovel dipper, stress distribution

For citation

Velikanov V.S., Chernukhin S.A., Telminov N.S., Dremine A.V., Lomovtseva N.V., Sitdikova S.V. On the Influence of the Granulometry of Blasted Rock Mass on the Stress Distribution in the Working Equipment of a Quarry Excavator. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 30-43. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-4-30-43>

Введение

Анализ мирового рынка выявил тенденцию постоянного увеличения потребления основных видов твёрдых полезных ископаемых. На разных этапах развития мировой промышленности, сопровождаемых как экономическим подъёмом, так и спадом, отмечались колебания спроса на минеральные ресурсы. Суммарный объём его потребления за последние полвека растёт, данный рост обусловлен увеличением численности населения и неуклонным ростом промышленного производства. Добыча твёрдых полезных ископаемых открытым способом на протяжении всей истории горных разработок является самым значимым и масштабным направлением. Согласно исследованиям [1, 2], на открытые горные работы (ОГР) приходится порядка 73%

добываемых твёрдых полезных ископаемых в мире. В США этот показатель превышает 80%, а в Российской Федерации и странах СНГ – около 70%. Устойчивое увеличение объёмов открытых горных работ сопровождается углублением карьеров, ростом коэффициента вскрыши и зачастую снижением содержания полезных компонентов в руде.

На данном этапе экономического развития нашей страны существует зависимость от объёмов добычи и экспорта минерально-сырьевой базы, в частности таких ресурсов, как уголь, металлические руды (железная руда, медь и др.), то есть полезные ископаемые первой группы. Полезные ископаемые первой группы обладают достаточной сырьевой базой для удовлетворения внутренних потребностей и потенциального экспорта при различных сценариях экономического

развития. Аналитические отчеты и данные Федеральной службы государственной статистики показывают, что объемы добычи угля в РФ стабильно увеличивались с 2014 по 2019 годы. В 2020 году произошло снижение на 9,6% по сравнению с предыдущим годом, до 361,8 млн т, при этом валовая добыча (включая пустую породу) составила 402,1 млн т. В настоящее время в России эксплуатируются 108 угольных шахт и 224 разреза, при этом доля открытых работ выросла с 68 до 79%. Однако половина коксуемого угля (42,3 млн т в 2020 году) добывается подземным способом, часто в сложных горно-геологических условиях. Представленные результаты динамики объемов добычи угля отражены на **рис. 1, а**.

Одну из лидирующих позиций наша страна занимает по объему добываемого железнорудного сырья. Прирост производительности этого направления за последние годы составил порядка 15%. Одна пятая доля из 46 месторождений расположена в Уральском федеральном округе (**рис. 1, б**) [1, 2].

Еще одним стратегически важным направлением в горнодобывающей отрасли является добыча медной руды. Заметный рост объемов добычи в этом направлении с 2018 года позволяет России находиться в десятке крупнейших производителей медной рудничной продукции. Такое увеличение объемов добычи

связано с появлением новых разрабатываемых месторождений и выходом их на номинальную мощность. На 2020 год насчитывалось порядка 48 месторождений, 40 из которых существенно медных и 8 комплексных медесодержащих. Согласно исследованиям [2], объем производства медной руды составил 924,1 тыс. т (**рис. 1, в**).

Увеличение объемов добычи твердых полезных ископаемых стимулирует рост спроса на горнодобывающую технику. Ежегодное увеличение объемов выпуска горнодобывающей техники составляет от 8 до 10%. Основной номенклатурой российских производителей, занимающихся производством горных машин, являются карьерные экскаваторы, порядка 70% от общего объема [3].

На данный момент на открытых горных выработках России и стран СНГ эксплуатируется более 490 единиц карьерных мехлопат и гидравлических экскаваторов. Актуальность исследовательских задач, решаемых в данной работе, обусловлена тем, что отечественный и мировой опыт работы карьерного выемочно-погрузочного оборудования показывает, что при разработке крепких скальных пород в сложных забоях наиболее эффективными являются карьерные мехлопаты [4].

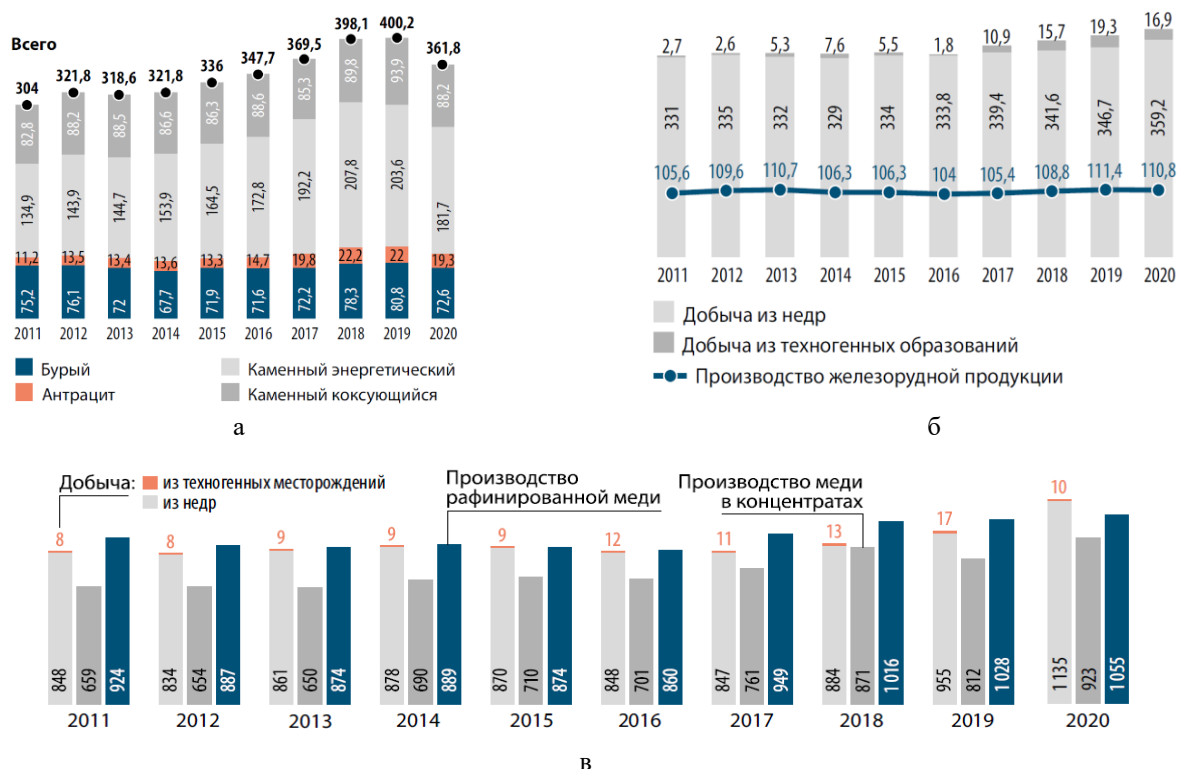


Рис. 1. Динамика добычи угля и металлических руд в 2011–2020 годах: а – объем добычи углей, млн т; б – объем добычи железных руд и производства железорудной продукции, млн т; в – динамика добычи меди, производства меди в концентрате и рафинированной меди (включая вторичный металл), тыс. т
 Fig. 1. Dynamics of coal and metal ore extraction from 2011 to 2020: а is coal extraction volume, million tons; б is iron ore extraction volume and iron ore product output, million tons; в is dynamics of copper extraction, copper concentrate production, and refined copper (including secondary metal) production, thousand tons

Буровзрывные работы (БВР) представляют собой критически важный этап в процессе горного производства. Их проведение на карьерах направлено на разрушение и дробление горной массы до нужного размера фракций. Качество выполнения БВР оказывает значительное влияние на последующие операции, такие как экскавация, транспортировка и обогащение полезных ископаемых, которые являются наиболее энергоемкими в горно-обогатительном производстве. В настоящее время затраты на отбойку горной массы для горнодобывающих предприятий России варьируются от 20 до 35%, в зависимости от твердости горных пород. При этом каждое предприятие устанавливает свои требования к гранулометрическому составу взорванной горной массы (ВГМ) и размеру негабарита. На эти параметры влияют различные факторы, включая тип используемого на карьере выемочно-погрузочного оборудования (геометрическая емкость ковша), наличие дополнительного оборудования для вторичного дробления, а также физико-механические свойства полезного ископаемого и другие параметры.

Научные исследования [5] показывают, что производительность драглайна в значительной мере зависит от гранулометрического состава породы в забое. Установлено, что при увеличении доли фракций 0–200 мм в два раза производительность драглайна возрастает в три раза. В то же время при увеличении доли фракций 401–800 мм производительность экскаватора снижается в 5 раз, а при увеличении объема фракции 301–400 мм во ВГМ в 1,4 раза производительность драглайна падает в три раза. Эти зависимости также актуальны для подземной добычи полезных ископаемых. В частности, исследования [6] показали, что выход негабаритов существенно влияет на производительность погрузочно-доставочных машин.

С увеличением объемов взрывных работ часто наблюдается рост выхода крупных негабаритных фракций. Согласно проведенным исследованиям [4] 13-ти экскаваторов (ЭКГ-10 и ЭКГ-8) в условиях карьера ПАО «Ураласбест» за период с января 2019 по февраль 2021 года, выявлена пропорциональная зависимость количества отказов в карьерах экскаваторов от доли негабарита во взорванной горной массе (рис. 2). Это может быть связано с ухудшением горно-геологических условий по мере увеличения глубины разработки, неправильно подобранными параметрами буровзрывных работ, что обусловлено стремлением

сократить производственные затраты, и другими факторами. Такое явление ведет к неконтролируемому росту дополнительных расходов на вспомогательные операции, что в итоге отрицательно сказывается на экономической эффективности горнодобывающего предприятия [1, 7]. Согласно данным, полученным эмпирическим путем, ведущими организациями, специализирующимися на буровзрывной деятельности, наиболее важным показателем качества БВР является объем выхода негабарита, который не должен превышать 3% от общего объема взорванной горной массы. К факторам, влияющим на качество БВР, относят плотность применяемого взрывчатого вещества (ВВ), диаметр, глубину и сетку скважин, выбирающихся в зависимости от физико-технических характеристик взрывающейся породы.

Анализ литературных источников

Проведенный анализ научных исследовательских направлений по методам оценки распределения гранулометрического состава ВГМ показал значительное увеличение числа публикаций за последние десять лет. Ведущими странами по количеству опубликованных работ являются Китай, США и несколько западноевропейских стран. Технология оптического анализа крупности фрагментированных пород широко используется уже на протяжении многих лет (Franklin et. al, 1996). Система анализа изображений WipFrag была изначально разработана для оценки фрагментации взорванной породы с использованием переносной камеры и инструментов ручного анализа (Maerz et. al, 1987; Maerz et. al, 1996; Maerz, 1998). Так, в работе Bahrami et al. (2011) для разработки модели фрагментации горных пород использованы 220 наборов данных, собранных на действующих железных рудниках. В рамках исследования выбраны основные параметры: сетка скважин, линия наименьшего сопротивления, диаметр скважины, глубина скважины, длина забойки, удельный объем бурения, показатель взрываемости, вес заряда на интервал замедления, класс SMR, плотность и удельный расход ВВ [6]. В модели реализован алгоритм обратного распространения ошибки, как наиболее эффективный метод обучения многослойной сети с тремя или более слоями (входной, скрытый и выходной).

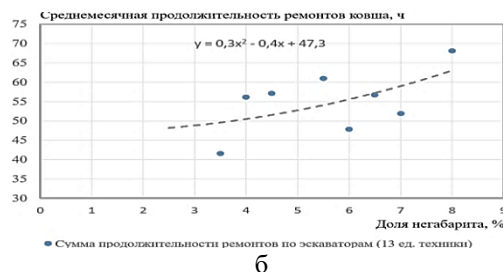
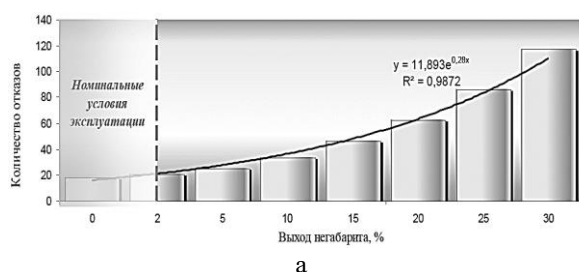


Рис. 2. Влияние выхода негабарита: а – на количество отказов экскаватора; б – на продолжительность ремонтов ковша
 Fig. 2. The impact of oversized fragments: а is on the number of excavator failures, б is on the duration of shovel dipper repairs

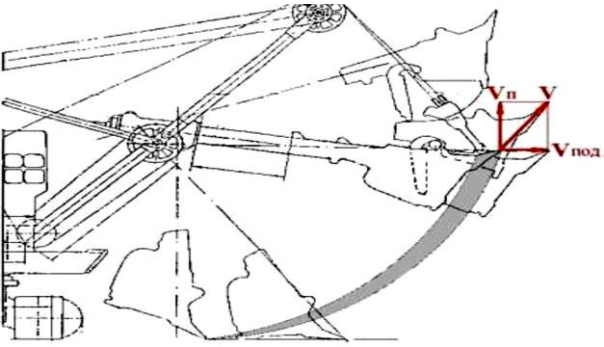
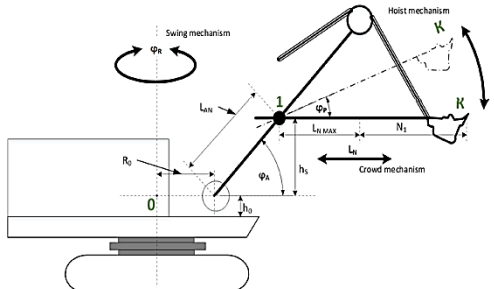
В статье Kulatilake et al. (2012) собраны результаты для 109 комплексов взрывных работ из различных карьеров и разработана прогнозная модель фрагментации с применением нейронной сети на базе многомерного регрессионного анализа. В исследованиях Sayadi et al. (2013) выполнено сравнительное исследование производительности нейронных сетей для прогнозирования фрагментации горных пород при взрывных работах на известняковых рудниках. При этом применены нейронная сеть с обратным распространением ошибки и нейронная сеть радиально-базисных функций. В работе Enayatollahi et al. (2014) изучены 70 схем взрывных работ, полученных на железных рудниках. В рамках исследования оценивались прогнозные модели, разработанные двумя способами: с использованием многомерного регрессионного анализа и искусственной нейронной сети. В работе Dhekne et al. (2014) в целом рассмотрены и описаны случаи успешного применения методов на базе машинного обучения для прогнозирования фрагментации горных пород на горнодобывающих предприятиях. В публикации определены ключевые элементы ИНС и очерчен широкий спектр их применения в горнодобывающей промышленности. В заключении описан ряд недостатков при разработке прогнозных моделей.

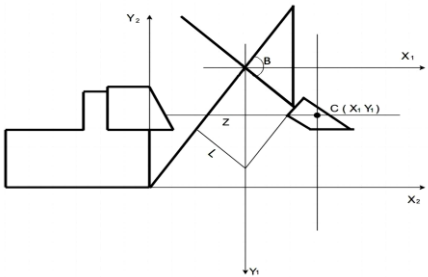
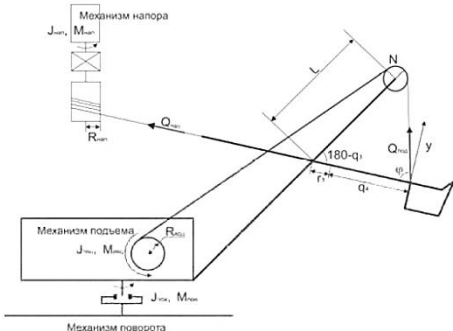
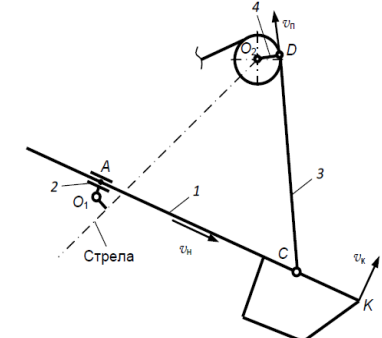
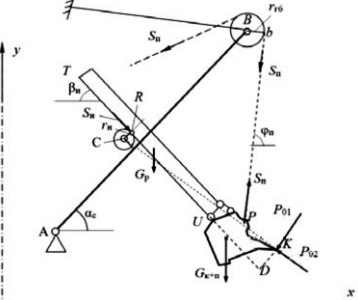
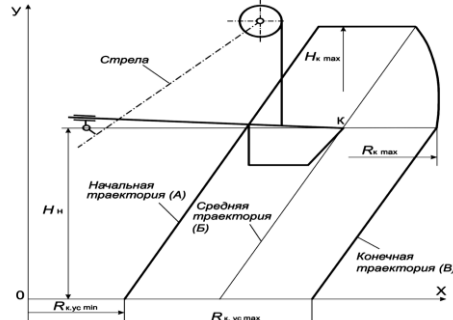
В работе Murlidhar et al. (2018) описана новая гибридная модель прогнозирования фрагментации горных пород на известняковом карьере. В рамках ис-

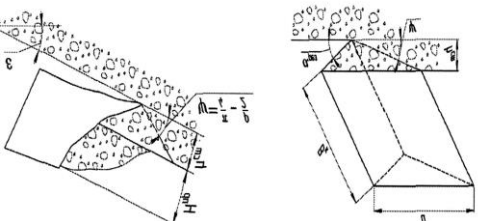
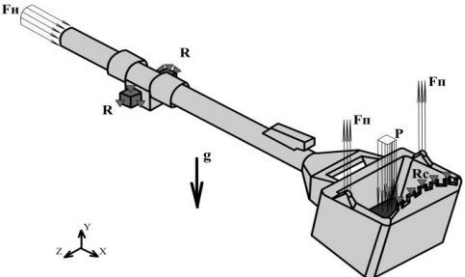
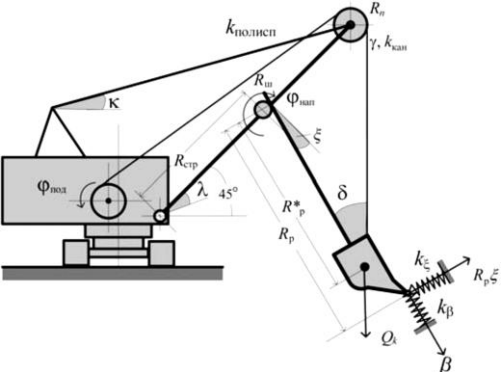
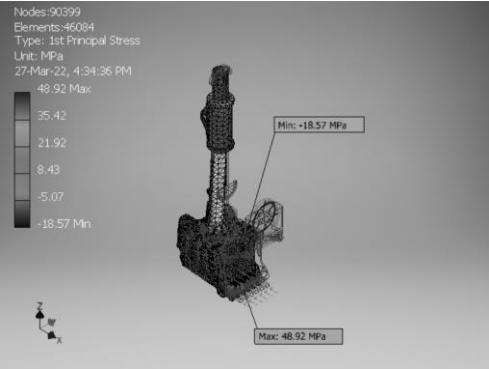
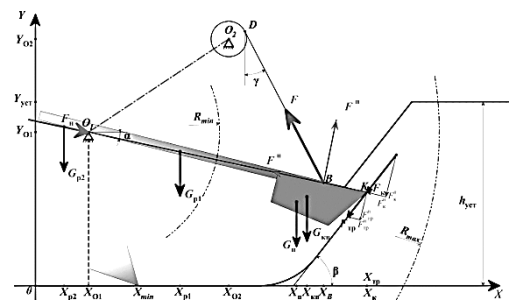
следования методом сравнения полученных результатов оценивалось влияние разработанного алгоритма на эффективность применения ИНС. В работе Dimitraki et al. (2019) на карьерах по добыче нерудных материалов в Греции успешно реализован другой подход к прогнозированию средней крупности фрагментации взорванной породы. В данном исследовании прогнозирование с помощью ИНС применено для оценки влияния на фрагментацию отдельных особенностей организации взрывных работ и инженерно-геологических характеристик. В исследовании Xie et al. (2021) объединены различные методы машинного обучения, включая ИНС, для оптимизации и повышения эффективности взрывных работ с использованием мягких вычислительных прогнозных моделей. Также оценено влияние входных параметров на точность прогнозной модели. Для разработки гибридных моделей использованы 136 наборов данных, собранных во время взрывных работ на известняковом руднике во Вьетнаме.

Вообще говоря, вопросам влияния характеристик взорванной горной массы на рабочее оборудование карьерных экскаваторов посвящено достаточно много научно-исследовательских работ, понятно, что охарактеризовать весь пласт таких работ в рамках данной публикации не представляется возможным. В табл. 1 приведены лишь отдельные современные публикации, касаемые данного вопроса.

Таблица 1. Краткий обзор исследовательских работ
Table 1. Brief overview of research works

| № п/п | Исследование | Авторы, проводившие исследование |
|-------|---|--|
| 1 |  | Хромой М.Р., Свиначук В.П., Свиначук П.В. [8] |
| 2 |  | Тытиук V., Khandakji K, Sivyakova G. и др. [9] |

| № п/п | Исследование | Авторы, проводившие исследование |
|-------|---|----------------------------------|
| 3 |  | Волкова Е.А. [5] |
| 4 |  | Певзнер Л.Д., Бабаков С.Е. [10] |
| 5 |  | Комиссаров А.П. и др. [11] |
| 6 |  | Шестаков В.С. и др. [12] |
| 7 |  | Лукашук О.А., Летнев К.Ю. [13] |

| № п/п | Исследование | Авторы, проводившие исследование |
|-------|---|---|
| 8 |  | <p>Сайтов В.И., Андреева Л.И., Красникова Т.И. [14]</p> |
| 9 |  | <p>Болотнев А.Ю., Унагаев Е.И., Авдеев А.Н. [15]</p> |
| 10 |  | <p>Кузнецов В.Ф., Плеханов Ю.В. [16]</p> |
| 11 |  | <p>До Дык Чонг [17]</p> |
| 12 |  | <p>Шешукова Е. И. и др. [18]</p> |

Полученные результаты и их обсуждение

Очевиден и тот факт, что в тяжёлых условиях эксплуатации, а именно высокая степень неоднородности, плотность добываемых пород составляет 2,48–2,78 т/м³, коэффициент крепости по шкале М.М. Протодьяконова 15–17, повышенная абразивность 66–90 мг, происходят необратимые процессы в металлоконструкциях рабочего оборудования карьерного экскаватора, приводящие к стремительному нарастанию потока отказов. Обработанная статистическая информация [4] количества отказов карьерного оборудования в период с 2011 по 2015 годы показана на рис. 3. Причём, несмотря на тяжёлые условия экскавации, целевой функцией, характеризующей эффективность использования экскаватора во времени, остаётся высокая производительность, а целевой показателем – длительность одного полного цикла экскавации составляет не более 30 с.

В процессе работы карьерного экскаватора непосредственный контакт с горной массой в забое осуществляет рабочий орган (ковш). Таким образом,

особенности взаимодействия ковша с породой и granulometric состав развала определяют схему работы и характер рабочего процесса. В научнотехнической литературе подробно рассматриваются конструкции ковшей, применяемых на экскаваторах, которые отличаются большим разнообразием в зависимости от назначения, способов изготовления и разгрузки. Ковши прямых лопат, в зависимости от типа соединения с рукоятью, делятся на две категории: с шарнирным и жестким соединением. Большинство карьерных экскаваторов используют ковши с шарнирным соединением. В случае жесткого соединения концевая отливка рукояти служит задней стенкой ковша. Классификация типов ковшей с емкостью более 4 м³ осуществляется согласно ОСТ 24.072.06–80.

Основными параметрами, влияющими на образование трещин в металлоконструкциях рабочего органа, является возникновение резких перегрузок вследствие столкновения ковша с негабаритами, с массивом горных пород, с невзорванными естественными отдельностями и при аварийном падении ковша (рис. 4, табл. 2).



Рис. 3. Анализ показателей надёжности рабочего оборудования по парку карьерных экскаваторов
Fig. 3. Analysis of reliability indicators of the working equipment across the quarry excavator fleet

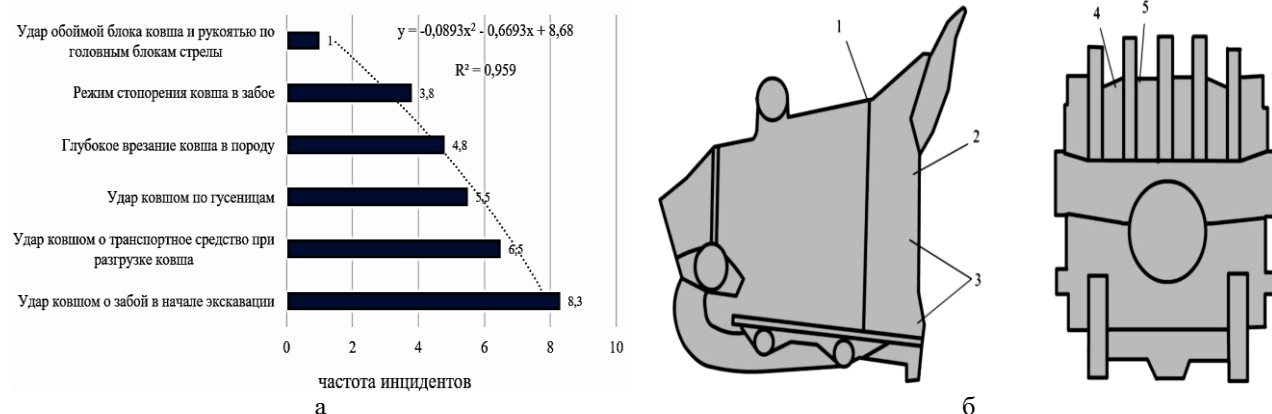



Рис. 4. Спектр относительных частот возможных инцидентов рабочего оборудования (ковш) (а) и места разрушения корпуса ковша экскаватора (б): 1 – зона соединения передней и боковых стенок ковша; 2, 3 – передние стенки ковша; 4, 5 – крепления зубьев ковша

Fig. 4. Spectrum of relative frequencies of potential incidents involving the working equipment (shovel dipper) (a); locations of shovel dipper body failures on the excavator (b): 1 is junction area of the front and side walls of the shovel dipper; 2, 3 are front wall of the shovel dipper; 4, 5 are tooth attachments on the dipper

Таблица 2. Возможные варианты дефектов и неправильных ремонтных воздействий на элементы рабочего оборудования

Table 2. Possible defects and incorrect repair actions on components of the working equipment

| Пример верного технического обслуживания и эксплуатации узлов экскаватора | | Нарушения условий технического обслуживания и эксплуатации | |
|---|---|--|--|
|  | соединение коромысла ковш шплинтовое соединение + кольцо |  | неправильное соединение коромысла ковш |
|  | соединение серьга ковш шплинт+ втулка |  | неправильное соединение шплинт на сварке |
|  | соединение салазка с днищем ковша, шплинтовое соединение + кольцо |  | неправильное соединение салазка с днищем ковша на сварке |
|  | цепь открывание днище ковша, исправна |  | неисправна, износ звена цепи |

Для оценки воздействия качества подготовки забоя на эксплуатационные показатели и техническое состояние металлоконструкций экскаваторов на одном из горнодобывающих предприятий был проведён производственный эксперимент. В рамках этого эксперимента определялись параметры кусковатости взорванной горной массы и осуществлялся контроль за появлением трещин в металлоконструкциях. В качестве аппаратно-программного сопровождения экспериментальных исследований использовано отечественное оборудование компании «Давтех», разработанное в рамках программы импортозамещения высокотехнологичного оборудования. В программно-аппаратном комплексе реализован следующий способ, защищенный патентом определения гранулометрического состава [19], который заключается в том, что: посредством стереоскопической камеры получают стереоизображение развала горной породы; на основе полученного стереоизображения развала строят объемный рельеф поверхности развала, представляющий собой набор дальностей от матрицы стерео-

скопической камеры до поверхности выбранных участков развала горной породы и соответствующих им координат на изображении (рис. 5) [19].

Метод конечных элементов является одним из наиболее эффективных инструментов для анализа напряженно-деформированного состояния элементов металлоконструкций. С его помощью можно быстро и точно оценить прочность и долговечность конструкций, что особенно важно для карьерных экскаваторов, работающих в тяжелых горно-геологических условиях. Преимуществом метода конечных элементов является возможность учитывать различные факторы, влияющие на работу конструкции, такие как геометрия, материалы, внешние нагрузки и условия эксплуатации. Кроме того, метод конечных элементов обладает высокой точностью и надежностью результатов. При правильном подходе к моделированию и анализу можно получить детальную картину напряженно-деформированного состояния конструкции и предсказать возможные проблемы до их возникновения [20].

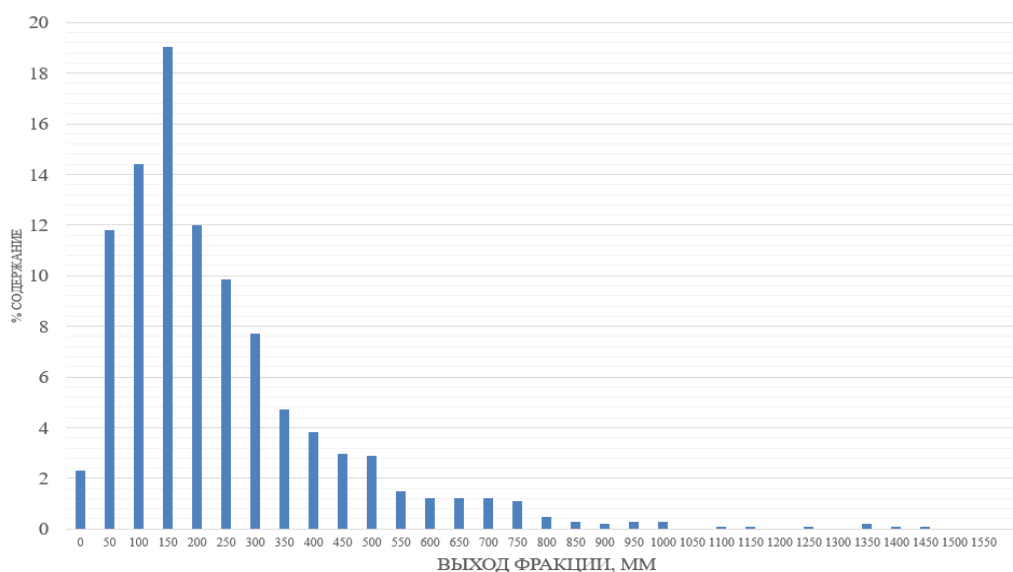
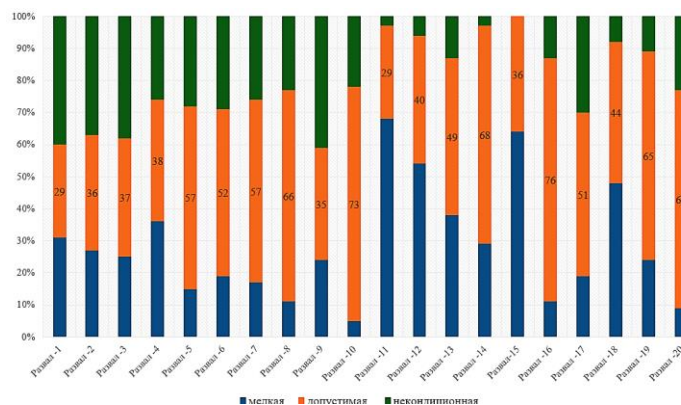
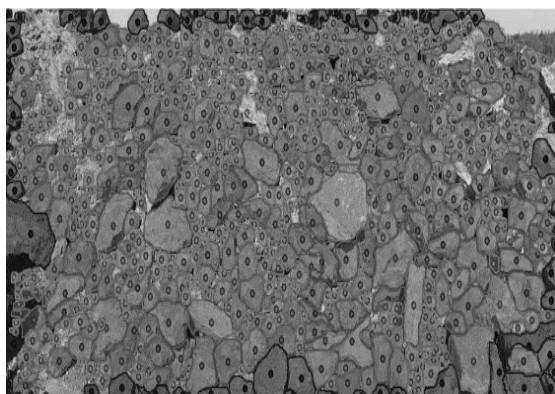


Рис. 5. Результаты производственного эксперимента на горнодобывающем предприятии УрФО
 Fig. 5. Results of the production experiment at the mining enterprise of the Ural Federal District

Согласно полученным результатам настоящего исследования ЭКГ-10 (табл. 3), можно выявить зависимость влияния гранулометрического состава в забое на вид изнашивания ковша экскаватора (воздействие на определенный участок). Таким образом, при работе с крупнокусковыми скальными породами основное воздействие породы приходится на нижнюю часть ковша и зубьев, а при мелкокусковой породе изнашивание равномерно распределяется как на нижнюю, так и верхнюю часть. Это обстоятельство играет важную роль в выборе технологического решения по повышению износостойкости ковшей карьерных экскаваторов.

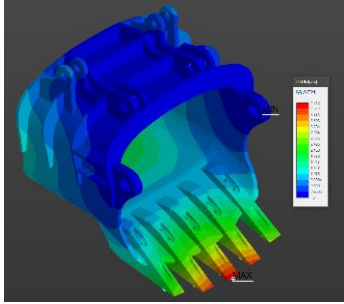
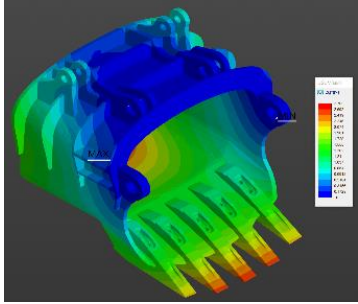
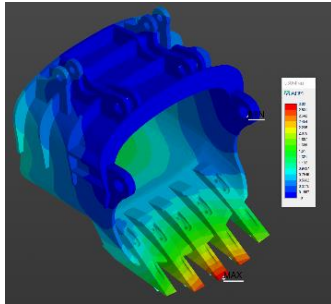
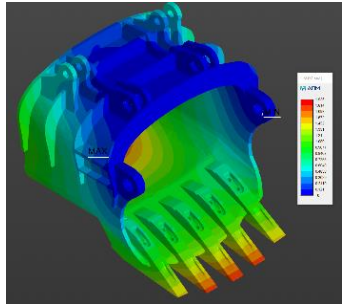
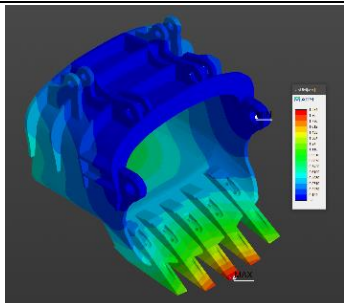
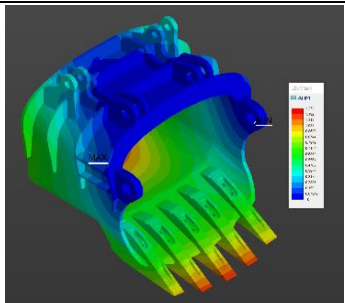
Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено и доказано, что гранулометрический состав горных пород – это один из основных

показателей, оказывающих прямое влияние на затраты на буровзрывные работы, а также на экономику последующих операций.

Комплексные исследования по установлению фактического распределения размеров кусков в развале с использованием инновационного отечественного оборудования, при условии обеспечения качества дробления взорванной горной массы в забое, определяемого содержанием негабаритного куска не более 3%, позволит разработать рекомендации по рациональным режимам управления карьерным экскаватором с целью минимизации внезапных отказов рабочего оборудования ЭКГ и разработку обновленной структуры ремонтного цикла, а также уменьшения продолжительности и стоимости ремонтных воздействий по парку карьерных экскаваторов, связанных с показателями гранулометрического состава взорванной горной массы в забое.

Таблица 3. Зависимость напряженно-деформированного состояния рабочего органа ЭКГ-10 при динамических нагрузках от грансостава в забое
 Table 3. Dependence of the stress-strain state of the working tool of EKG-10 under dynamic loads on the granulometric composition in the pit

| Медианный размер породы, мм | Фазы цикла черпания | |
|-----------------------------|---|---|
| | Внедрение ковша в породу | Финальная фаза |
| 200 |  |  |
| 130 |  |  |
| 95 |  |  |

Список источников

1. Дремин А.В., Великанов В.С. К вопросу о гранулометрическом составе взорванных скальных пород // Горная промышленность. 2023. № 4. С. 73–78. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-73-78>. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/18133-k-voprosu-o-granulometricheskom-sostave-vzorvannykh-skalnykh-porod>.
2. Государственный доклад от 22.12.2021, Минприроды РФ «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году». Москва, 2021. 572 с.
3. Великанов В.С. Научные основы системы снижения рисков отказов при управлении карьерным экскаватором: специальность 05.05.06 «Горные машины»: дис. ... д-ра техн. наук / Великанов Владимир Семенович; Уральский государственный горный университет. Екатеринбург, 2020. 292 с.
4. Иванова П.В. Выявление закономерностей изменения наработки карьерного электрического экскаватора большой единичной мощности с учетом воздействия факторов природно-техногенного характера: специальность 05.05.06 «Горные машины»: дис. ... канд. техн. наук / Иванова Полина Викторовна, 2019. СПб., 134 с. EDN JBMAOH.
5. Волкова Е.А. Повышение эффективности функционирования одноковшовых экскаваторов за счет улучшения эксплуатационных характеристик: специальность 05.05.06 «Горные машины»: дис. ... канд. техн. наук / Волкова Евгения Алексеевна, 2022. 131 с. EDN NRPQMS.
6. Рожков А.А. Исследование параметров технологии взрывной отбойки при подземной добыче гранулированного кварца: специальность 25.00.22 «Геотехнология (подземная, открытая и строительная)»: дис. ... канд. техн. наук / Рожков Артём Андреевич. Екатеринбург, 2019. 138 с. EDN EEQTWS.

7. Галушко Ф.И., Комягин А.О., Мусатов И.Н. Управление качеством взрывной подготовки горной массы на основе оптимизации параметров БВП // Горная промышленность. 2017. №5 (135). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-kachestvom-vzryvnoy-podgotovki-gornoj-massy-na-osnove-optimizatsii-parametrov-bvp> (дата обращения: 17.06.2024).
8. Хромой М.Р., Свиначук В.П., Свиначук П.В. Изнашивание вооружения ковша карьерного однокорпусного экскаватора // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2010. № 8. С. 106-113. EDN LOXOJO.
9. Determining the parameters of the trajectory of the bucket of mining quarries excavators / Tytiuk V., Khandakji K., Sivyakova G., Karabut N., Chornyi O., Busher V. // E3S Web of Conferences. 2021, 280, 05013. 10.1051/e3sconf/202128005013.
10. Певзнер Л.Д., Бабаков С.Е. Математическая модель динамики карьерного экскаватора как объекта управления // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. № 12. С. 249-252. EDN RMSLHJ.
11. Оценка степени противодействия двигателей приводов главных механизмов карьерного экскаватора / А.П. Комиссаров, О.А. Маслеников, Р.Ш. Набиуллин, С.А. Хорошавин // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 6(164). С. 10-16. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-10-16. EDN NIDNFT.
12. Безкоровайный П.Г., Шестаков В.С., Извеков К.А. Оптимизация рабочего оборудования карьерного экскаватора // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности : сборник трудов XX международной научно-технической конференции «Чтения памяти В. Р. Кубачека», проведенной в рамках Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 07–08 апреля 2022 года. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2022. С. 222-225. EDN EPKEQI
13. Лукашук О.А., Летнев К.Ю. Определение энергозатрат при экскавации грунта // ГИАБ. 2018. №6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-energoztrat-pri-ekskavatsii-grunta> (дата обращения: 18.06.2024).
14. Сайтов В.И., Андреева Л.И., Красникова Т.И. Влияние грансостава забоя на количество отказов механизма напора экскаватора циклического действия // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 2. С. 234. EDN OXCNGV.
15. Болотнев А.Ю., Унагаев Е.И., Авдеев А.Н. Исследование распределения напряжений в рабочих узлах карьерного экскаватора ЭКГ-12,5 // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 12(59). С. 92-95. EDN NCDFJI.
16. Кузнецов В.Ф., Плеханов Ю.В. Математическая модель взаимодействия рабочего оборудования экскаватора-мехлопаты с забоем // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 1. С. 12-14. EDN JVVQGP.
17. До Д. Ч. Оценка нагруженности основных металлоконструкций экскаваторов ЭКГ-10, работающих на угольных разрезах Вьетнама : специальность 05.05.06 «Горные машины» : дис. ... канд. техн. наук / До Дык Чонг. СПб., 2022. 104 с. EDN CFBWTA.
18. Эффективность функционирования карьерного экскаватора как эргатической системы / Д.А. Шибанов, С.Л. Иванов, Е.И. Шешукова, Е.С. Недашкова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 11-1. С. 144-158. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_144. EDN ATIRKG.
19. Дремин А. В., Марков Ю. В. Способ определения гранулометрического состава развала горной массы: пат. 2807542 РФ: МПК G01N 33/24, E21C 41/26. № 2023113622; заявл. 25.05.2023; опубл. 16.11.2023; бюл. № 32.
20. Чепурненко А.С., Тюрина В. С. Применение метода конечных элементов в сочетании с методом контактного слоя для определения напряженно-деформированного состояния многослойных балок // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2023. № 4. С. 130–139. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.13

References

1. Dremine A.V., Velikanov V.S. On the granulometric composition of blasted rock formations. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2023;(4):73-78. (In Russ.). <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-4-73-78>. Available at: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/18133-k-voprosu-o-granulometricheskom-sostave-vzrovannykh-skalnykh-porod>.
2. On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2020. State report. Moscow: Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, 2021. 572 p.
3. Velikanov V.S. *Nauchnye osnovy sistemy snizheniya riskov otkazov pri upravlenii karernym ekskavatorom: dis. ... dokt. tekhn. nauk* [Scientific foundations of risk reduction system for failures management of quarry excavator. Doctoral dissertation]. Yekaterinburg, 2020, 292 p.
4. Ivanova P.V. *Vyyavlenie zakonmernostej izmeneniya narabotki karernogo elektricheskogo ekskavatora bolshoj edinichnoj moshchnosti s uchetom vozdeystviya faktorov prirodno-tekhnogennoho haraktera: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Identification of patterns of wear of large-capacity quarry electric excavator, taking into account the influence of natural and man-made factors. Ph.D. dissertation]. St. Petersburg, 2019, 134 p. EDN JBMAOH.
5. Volkova E.A. *Povyshenie effektivnosti funkcionirovaniya odnokovshovykh ekskavatorov za schet*

- uluchsheniya ekspluatatsionnykh karakteristik: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the efficiency of single-bucket excavators through improved operational characteristics. Ph.D. dissertation]. Yekaterinburg, 2022, 131 p. EDN NRPQMC.
6. Rozhkov A.A. *Issledovanie parametrov tekhnologii vzryvnoy otbojki pri podzemnoy dobyche granulirovannogo kvarca: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Study of parameters of explosive breaking technology in underground mining of granulated quartz. Ph.D. dissertation]. Yekaterinburg, 2019, 138 p. EDN EEQTWS.
 7. Galushko F.I., Komyagin A.O., Musatov I.N. Quality management of explosive preparation of rock mass based on optimization of BVR parameters. *Gornaya promyshlennost* [Mining Industry]. 2017;(5(135)). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/upravlenie-kachestvom-vzryvnoy-podgotovki-gornoy-massy-na-osnove-optimizatsii-parametrov-bvr> (Accessed June 17, 2024). (In Russ.)
 8. Khromoy M.R., Svinarchuk V.P., Svinarchuk P.V. Wear of bucket armament of quarry single-bucket excavator. *Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universitet*. [Scientific Bulletin of Moscow State Mining University], 2010;(8):106-113. (In Russ.) EDN LOXOJO.
 9. Tytiuk V., Khandakji K., Sivyakova G., Karabut N., Chorny O., Busher V. Determining the parameters of the trajectory of the bucket of mining quarries excavators. *E3S Web of Conferences*. 2021;280(05013). DOI: 10.1051/e3sconf/202128005013.
 10. Pevzner L.D., Babakov S.E. Mathematical model of the dynamics of a quarry excavator as an object of management. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining Information-Analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2013;(12):249-252. (In Russ.) EDN RMSLHJ.
 11. Komissarov A.P., Maslenikov O.A., Nabiullin R.Sh., Khoroshavin S.A. Assessment of the degree of resistance of drives of main mechanisms of quarry excavator. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics]. 2022;(6(164)):10-16. (In Russ.) DOI: 10.26730/1816-4528-2022-6-10-16. EDN NIDNFT.
 12. Bezkorovainy P.G., Shestakov V.S., Izvekov K.A. Optimization of quarry excavator working equipment. *Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promyshlennosti : sbornik trudov XX mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Chteniya pamyati V.R. Kubacheka", provedennoj v ramkah Uralskoj gornopromyshlennoj dekady* [Technological equipment for mining and oil and gas industry: proceedings of the XX International Scientific and Technical Conference "Readings in memory of V.R. Kubachek", held within the framework of the Ural Mining Decade], Yekaterinburg, April 07-08, 2022. Yekaterinburg: Ural State Mining University, 2022, pp. 222-225. (In Russ.) EDN EPKEQI.
 13. Lukashuk O.A., Letnev K.Yu. Determination of energy consumption during excavation. *GIAB* [Mining information and analytical bulletin]. 2018;(6). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-energozatrata-pri-ekskavatsii-grunta> (Accessed June 18, 2024).
 14. Saitov V.I., Andreeva L.I., Krasnikova T.I. Influence of the borehole granulometric composition on the number of failures of the actuator mechanism of cyclic excavator. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2012;(2):234. (In Russ.) EDN OXCNGV.
 15. Bolotnev A.Yu., Unagaev E.I., Avdeev A.N. Investigation of stress distribution in working units of EKG-12.5 quarry excavator. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2011;(12(59)):92-95. (In Russ.) EDN NCDFJI.
 16. Kuznetsov V.F., Plekhanov Yu.V. A mathematical model of the interaction of the working equipment of a mechanical shovel excavator with a face borehole. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics], 2009;(1):12-14. (In Russ.) EDN JWVQGP.
 17. Do D.Ch. *Ocenka nagruzhennosti osnovnykh metallokonstrukcij ekskavatorov EKG-10, rabotayushchih na ugolnykh razrezakh Vietnama: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Evaluation of the load on the main metal structures of EKG-10 excavators operating in coal mines in Vietnam. Ph.D. dissertation]. St. Petersburg, 2022, 104 p. EDN CFBWTA.
 18. Shibanov D.A., Ivanov S.L., Sheshukova E.I., Nedashkowskaya E.S. Efficiency of quarry excavator operation as an ergatic system. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining Information-Analytical Bulletin (scientific and technical journal)]. 2023;(11-1):144-158. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_144. EDN ATIRKG.
 19. Dremine A.V., Markov Yu.V. *Sposob opredeleniya granulometricheskogo sostava razvala gornoj massy* [Method for determining the granulometric composition of rock mass fragmentation]. Patent RF, no. 2807542, 2023.
 20. Chepurnenko A.S., Tyurina V.S. Application of the finite element method in combination with the contact layer method for determining the stress-strain state of multilayer beams. *Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika* [PNRPU Mechanics Bulletin]. 2023;(4):130-139. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.13

Поступила 19.06.2024; принята к публикации 23.09.2024; опубликована 24.12.2024
Submitted 19/06/2024; revised 23/09/2024; published 24/12/2024

Великанов Владимир Семенович – доктор технических наук, профессор,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург;
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: rzhik_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

Чернухин Станислав Алексеевич – кандидат технических наук, доцент,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург;
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: Stas_chernuhin@mail.ru. ORCID 0000-0003-3423-6129

Тельминов Никита Станиславович – студент,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия.
Email: Nikita.Telminov@urfu.me

Дремин Александр Владимирович – генеральный директор,
ООО «ДАВТЕХ», Екатеринбург, Россия.
Email: info@davtech.ru

Ломовцева Наталья Викторовна – кандидат педагогических наук, доцент,
проректор по образовательной деятельности и цифровизации,
Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: lomovtseva-nv@urgau.ru, ORCID 0000-0002-9350-3066

Ситдикова Светлана Валерьевна – старший преподаватель кафедры автоматике
и компьютерных технологий,
Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.
Email: siriniti.86@mail.ru

Vladimir S. Velikanov – DrSc (Eng.), Professor,
Ural State Mining University, Yekaterinburg,
Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: rzhik_00@mail.ru. ORCID 0000-0001-5581-2733

Stanislav A. Chernukhin – PhD (Eng.), Associate Professor,
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.
Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: Stas_chernuhin@mail.ru. ORCID 0000-0003-3423-6129

Nikita S. Telminov – Student,
Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia.
Email: Nikita.Telminov@urfu.me

Alexander V. Dremin – General Director,
DAVTECH LLC, Yekaterinburg, Russia.
Email: info@davtech.ru

Natalia V. Lomovtseva – PhD (Pedagogy), Associate Professor,
Vice-Rector for Educational Activities and Digitalization,
Ural State Agrarian University, Yekaterinburg, Russia.
Email: lomovtseva-nv@urgau.ru. ORCID 0000-0002-9350-3066

Svetlana V. Sitdikova – Senior lecturer,
Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia.
Email: siriniti.86@mail.ru