

АНАЛИЗ РИСКОВ ПРИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИИ ЭКСКАВАТОРА НА КАРЬЕРЕ НЕРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бугебрин Ш., Соловьев И.В., Михайлов А.В.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: карьер нерудных материалов, экскаватор, автосамосвал, позиционирование, риски.

Аннотация. В статье проведены результаты анализа позиционирования машин выемочно-транспортного комплекта: экскаватор-самосвал в процессе выемки нерудных материалов на уступе карьера во избежание аварийных ситуаций. С учетом ряда факторов: стабильность уступа, стабильность машины, нагрузка, видимость оператора и близость к окружающим объектам, дан анализ категорий рисков возникновения аварийных ситуаций. Полученные результаты дают представление о структуре и причинах возникновения рисков при позиционировании экскаватора на карьере нерудных материалов. Учет рационального позиционирования оборудования при добыче нерудных материалов и могут быть основой для совершенствования оборудования выемочно-транспортного комплекта с интегрированным в него элементами искусственного интеллекта для снижения вероятности рисков возникновения аварийных ситуаций и соблюдения техники безопасности при проведении работ.

RISK ANALYSIS IN THE POSITIONING OF THE EXCAVATOR IN THE MINING OF NONMETALLIC MATERIALS

Bouguebrine C., Soloviev I. V., Mikhailov A. V.

Saint-Petersburg mining university, Saint-Petersburg

Keywords: non-metallic materials quarry, excavator, dump truck, positioning, risks.

Abstract. The article present analyses results of the positioning complex excavator and dump-truck during the operation process of non-metallic materials on the bench to avoid accident. By considering factors such as bench stability, equipment stability, load, operator visibility, and proximity to surrounding structures, the analysis of risks categories occurrence of accidents is provided. The results provide a vision into the structure and causes of risks when positioning an excavator in a non-metallic materials quarry. Consideration of rational machinery positioning during extraction of non-metallic materials, could be a foundation for improving the complex machinery of excavation-transport with the artificial intelligence elements integrated into it to reduce the probability of accident situations risks and compliance with safety standards during the work.

Введение. Одноковшовые экскаваторы получили широкое распространение в горной промышленности при ведении горных работ по добыче нерудных материалов открытым способом [1, 2]. Сочетание экскаватора с карьерными автосамосвалами является одним из самых распространенных вариантов формирования комплектов оборудования на горном предприятии [3-6].

В настоящее время в Алжире существует большой спрос на нерудные материалы. Алжир производит широкий спектр строительных материалов, таких как песок и гравий, известняк и мрамор. Объемы добычи песка в Алжире по данным на 2016 год составили более 3,0 млн. т с перспективой роста объемов до 26 млн. т к 2026 году [7].

При постоянном росте объема производства вопросы увеличения производительности комплектов оборудования для выемки и транспортирования горной породы, сокращение времени рабочего цикла выемочно-доставочного комплекта, снижение рисков, приводящих к отказам и аварийным ситуациям, и обеспечение безопасности проведения технологического процесса добычи являются значимыми. Одной из актуальных задач является определение рационального позиционирования выемочно-погрузочного технологического оборудования в области ведения горных работ [8].

При функционировании выемочно-доставочного оборудования на карьерах нерудных материалов (песок, песчано-гравийные смеси, торф и пр.) следует учитывать вероятность возникновения рисков аварийных ситуаций при:

- работе экскаватора на уступе и возможной потере его устойчивости;
- взаимодействии машин комплекта в процессе функционирования;
- появлении персонала в рабочей зоне комплекта оборудования.

Анализ рисков возникновения аварийных ситуаций из-за нерационального позиционирования машин при функционировании оборудования выемочно-доставочного комплекта является целью данного исследования.

Материалы и методы. При анализе позиционирования приняты условия проведения добычных работ на сухойном песчаном карьере. Природный песок – неорганический сыпучий строительный материал с крупностью зерен до 5 мм, получаемый при разработке песчаных месторождений [9]. Песок относится к сыпучим породам с коэффициентом крепости $f=0,5$ по классификации горных пород по шкале проф. М.М. Протодяконова.

Анализ проведен на примере рабочего проекта разработки карьера строительных песков в Московском районе Московской области [10]. Разработка месторождения ведется открытым способом без применения буровзрывных работ. Система разработки отнесена к группе с постоянным положением рабочей зоны: сплошная поперечная однобортовая [11-13]. Устойчивость откосов уступов является основным условием безопасного ведения горных работ на карьерах. Обрушения и оползни откосов уступов приводят к нарушению всего технологического процесса [14].

Параметры системы разработки представлены в таблице 1 [10].

Табл. 1. Параметры разработки карьера строительных песков

Параметры системы разработки	Значение
Количество уступов	2 добычных
Высота добычного уступа, м	4,0-6,0
Минимальная ширина рабочей площадки, м	25,5
Угол откоса рабочего уступа, град	45
Минимальная длина фронта работ, м	100
Глубина карьера, м	4,8-13,7

Вскрышные породы и полезное ископаемое разрабатываются экскаваторами типа ЭО 4124, ЭО-5111 Б, ЭО-5124. Вскрышные породы в отвал, строительные пески и песчано-гравийный материал транспортируются автосамосвалами типа КАМАЗ-55111 грузоподъемностью 13 т [10].

Анализ рисков при позиционировании оборудования

1. Работа на краю уступа. При работе на краю уступа экскаватор находится в зоне повышенной опасности. Если экскаватор расположен слишком близко к краю уступа или на неустойчивом участке, то увеличивается риск обвала края под экскаватором и вероятность потери его устойчивости, что может привести к повреждению экскаватора и к травмам оператора или рабочего персонала, который находится поблизости [15].

В другом случае, если экскаватор расположен слишком далеко от края уступа, то снижается эффективность процесса экскавации: увеличивается время цикла погрузки/разгрузки. Размещение экскаватора при увеличенном расстоянии от края снижает эффективность погрузочно-разгрузочных работ: увеличивается риск просыпания материала из ковша и неточности позиционирования ковша при разгрузке [16].

Существует риск обвала края уступа из-за увеличенных нагрузок на грунт. Однако, при выборе рабочего оборудования с меньшим объёмом ковша снижается темпы производительность и экономическая эффективность производства [17].

Основным требованием при работе экскаватора на уступе является соблюдение безопасного расстояния от оси переднего натяжного колеса гусениц экскаватора до края уступа. Данный параметр выбирается исходя из физико-механических свойств горных пород (табл. 2) [18-21].

Табл. 2. Расстояние по горизонтали от основания откоса песчаной выемки до ближайшей опоры машины, м [22]

Глубина выемки, м	Расстояние, м
1,0	1,5
2,0	3,0
3,0	4,0
4,0	5,0
5,0	6,0

2. Взаимодействие машин комплекта в процессе функционирования

Расположение и взаимодействие экскаватора и самосвала при добыче полезных ископаемых открытым способом оказывают существенное влияние на эффективность процесса выемочно-доставочных работ [23].

При расположении самосвала располагается близко к экскаватору, повышается вероятность контакта рабочих частей экскаватора с самосвалом из-за наличия слепых зон видимости (рис. 1). Нарушение точности позиционирования самосвала в точке загрузки может привести к увеличению времени рабочего цикла из-за необходимости дополнительного маневрирования. Важно учитывать нестационарное положение забоев, вследствие чего транспортные пути постоянно удлиняются или укорачиваются и передвигаются [14].

При повороте платформы экскаватора к месту разгрузки ковш поднимается на разгрузочную высоту. Увеличенный угол поворота верхнего строения экскаватора при выгрузке приводит к увеличению времени цикла и снижению производительности [24]. На рисунке 2 приведен предпочтительный вариант расстановки самосвалов под погрузку для обеспечения максимальной эффективности процесса [25, 28]. Погрузка нерудных материалов в автосамосвалы должна производиться со стороны заднего или бокового борта.

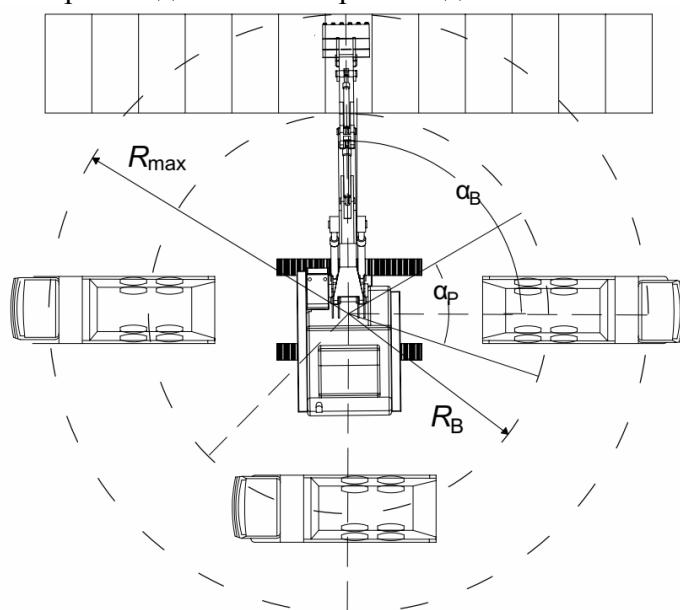


Рис. 1. Динамическая рабочая зона экскаватора: α_B – угол поворота платформы экскаватора для выгрузки; α_P – сектор репозиционирования; R_{max} – максимальный радиус копания и R_B – радиус выгрузки ковша

При осуществлении погрузки горной массы в кузов самосвала, ковш поднимается на некоторую высоту разгрузки (0,5 м). При значениях высоты, меньшей допустимой по паспорту ведения горных работ, существует вероятность удара ковша экскаватора по кузову самосвала.

Если высота разгрузки будет много больше допустимой, то это приводит к увеличению времени на выгрузки и может сопровождаться высокими значениями динамических нагрузок при взаимодействии горной породы с рабочей поверхностью кузова транспортного средства [27].

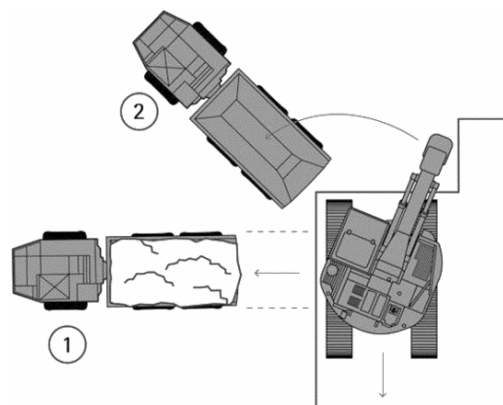


Рис. 2. Рациональная схема расстановки транспортного средства под погрузку [25]: 1 – угол поворота экскаватора 90 градусов; 2 – 45 градусов

3. *Наличие персонала в рабочей зоне.* Операторы горной техники часто сталкиваются с ограниченной видимостью и слепыми зонами при обзоре изнутри кабины. Слепые зоны относятся к областям, где прямая видимость оператора затруднена или невозможна [28]. Выделены 3 категории зон опасности для жизни человека при его нахождении на рабочей площадке экскаватора (рис. 3) [29].

Из-за наличия слепых зон в зоне работы экскаватора рабочий персонал карьера может находиться в зоне повышенной опасности.

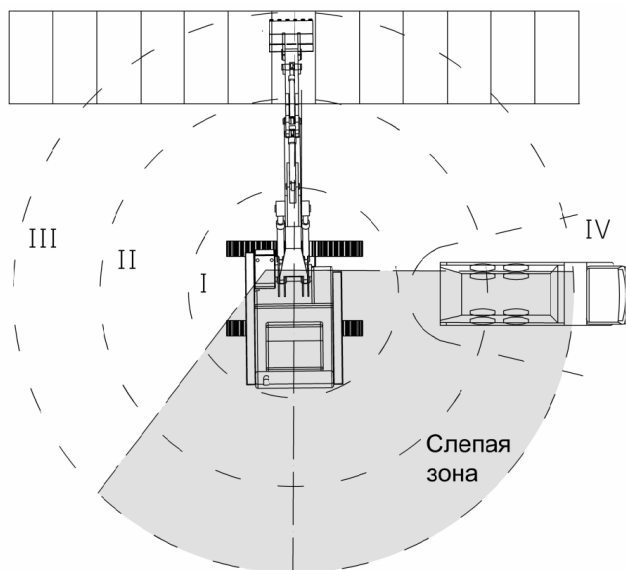


Рис. 3. Опасные зоны экскаватора: I – опасная зона; II – зона повышенного внимания; III – зона внимания; IV – опасная зона сзади самосвала

Заключение. При функционировании выемочно-доставочного комплекта на сухоройных карьерах нерудных материалов следует учитывать вероятность возникновения рисков аварийных ситуаций при работе экскаватора на уступе из-за возможной потери его устойчивости, при взаимодействии машин комплекта экскаватор-автосамосвал и при случайном появлении персонала в рабочей зоне.

Выделенные две группы рисков связаны с двумя основными критериями эффективности комплекта экскаватор-самосвал: безопасность ведения горных работ и максимизация производительности.

При работе экскаватора на уступе рациональное позиционирование достигается путем расположения передней оси колеса ходового оборудования от края уступа, при котором учтены геометрические характеристики машины и обеспечивается безопасность ведения

работ. Необходимое расстояние зависит от физико-механических свойств горных пород, на которых располагается экскаватор.

При взаимодействии экскаватора с автосамосвалом необходимо выбрать схему погрузки и разгрузки, при которой угол поворота экскаватора минимален и отвечает требованиям безопасности. Для это необходимо проводить работу в условиях, исключающие появление слепых зон для оператора выемочно-погрузочной техники.

При работе комплекта в зоне, где присутствует рабочий персонал, необходимо стремиться к возможности полного обзора из кабины вокруг оборудования для исключения ситуаций, где люди попадают под рабочие части экскаватора и самосвала из-за наличия слепых зон.

Полученный результат является основой для исследования совершенствования выемочно-транспортного комплекта оборудования с интегрированными в него элементами искусственного интеллекта для снижения вероятности рисков возникновения аварийных ситуаций и отказов техники из-за нерационального позиционирования в рабочей зоне.

В дальнейшем требуется решить следующие задачи.

1. Определить необходимое и достаточное количество элементов, отслеживающих рациональное позиционирование оборудования комплекта в рабочей зоне карьера;
2. Элементы интегрированных устройств искусственного интеллекта должны обладать высокой степенью надежности;
3. Интеграция элементов искусственного интеллекта в выемочно-транспортный комплект должна быть экономически оправдана.

Список литературы

1. Flores F.G., Kecskemethy A., Pöttker A. Workspace analysis and maximal force calculation of a face-shovel excavator using kinematical transformers // 12th IFToMM World Congress. – Besancon, 2007. – P. 375-381.
2. Papachristou A., Valsamos H., Dentsoras A. Optimal Initial Positioning of Excavators in Digging Processes // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering. 2010, vol. 224(7), pp. 835-844. DOI: 10.1243/09596518JSCE982.
3. Owolabi A.O. Loading and Haulage Equipment Selection for Optimum Production in a Granite Quarry // International Journal of Mining Science. 2019, vol. 5(2), pp. 35-40. DOI: 10.20431/2454-9460.0502004.
4. Santelices G., Pascual R., Lüer-Villagra A., Mac Cawley A., Galar D. Integrating mining loading and hauling equipment selection and replacement decisions using stochastic linear programming // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2017, vol. 31(1), pp. 52-65. DOI: 10.1080/17480930.2015.1115589.
5. Burt C.N., Caccetta L. Equipment Selection for Surface Mining: A Review // Interfaces. 2014, vol. 44(2), pp. 143-162. DOI: 10.1287/inte.2013.0732.
6. Fomin S.I. Foundations for technical solutions in organizing excavation of open ore pits // Journal of Mining Institute. 2016, vol. 221, pp. 644-644. DOI: 10.18454/PMI.2016.5.644.
7. Taib M. The Mineral Industry of Algeria [Advance release]. In 2017-2018 Minerals Yearbook. United States Geological Survey, 2021, p. 12. URL: <https://www.researchgate.net/publication/354167692>.
8. Бугебрин Ш., Шибанов Д. А., Михайлов А. В. Анализ необходимости рационального позиционирования экскаватора // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. трудов XXI Междунар. научно-техн. конфер. Чтения памяти В.П. Кубачека. – Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. – С. 30-32.
9. ГОСТ 25137–82 Материалы нерудные строительные, щебень и песок плотные из отходов промышленности, заполнители для бетона пористые. Классификация. – М.: Государственный строительный комитет СССР, 1987. – 7 с.
10. Технический проект разработки и рекультивации месторождения. – URL: <http://www.nedroved.net/wp-content/uploads/proekt-razrabotki-mestorojdeniay.pdf>.
11. Anistratov K. Yu. (Ed.). Open pit mining - The 21st century. Reference book. – Moscow: Sistema maksimum, 2019, vol. 2, 640 p.
12. Peng S.S.. Longwall Mining. CRC Press, 2019. DOI:10.1201/9780429260049.
13. Small C.A., Morgenstern N.R. Performance of a highwall in soft rock, Highvale mine, Alberta // Canadian Geotechnical Journal. 1992, vol. 29(3), pp. 353-363. DOI: 10.1139/t92-041.
14. Чирков А.С. Добыча и переработка строительных горных пород. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2001. – 623 с.
15. Pekol A. Evaluation and Risk Analysis of Open-Pit Mining Operations // BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. 2019, vol. 164(6), pp. 232-236. DOI: 10.1007/S00501-019-0854-9.

16. Edwards D.J., Holt G.D. Case study analysis of construction excavator Hamp; S overturn incidents // *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2010, vol. 17(5), pp. 493-511. DOI: 10.1108/09699981011074583/FULL/XML.
17. Lukashuk O.A., Komissarov A.P., Lagunova Y.A. Developing a digital control system for the main drives of an open-pit excavator as a major field of increasing the efficiency of excavator operation // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 709(2), pp. 022117. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022117.
18. Tyulenev M.A., Zhironkin S.A., Litvin O.I., Tyuleneva E.A., Zhironkina O.V., Markov S.O. Safe and Productive Application of Hydraulic Backhoes in Coal-Bearing Areas of Complex Structured Deposits // *Geotechnical and Geological Engineering*. 2017, vol. 35(5), pp. 2065-2077. DOI: 10.1007/S10706-017-0228-6/FIGURES/8.
19. Poniewierski J. Guidelines and considerations for open pit designers. 2018, p. 16. DOI: 10.13140/RG.2.2.24925.46563.
20. Maleki M.R., Mahyar M., Meshkabadi K. Design of Overall Slope Angle and Analysis of Rock Slope Stability of Chadormalu Mine Using Empirical and Numerical Methods // *Engineering*. 2011, vol. 3(9), pp. 965-971. DOI: 10.4236/ENG.2011.39119.
21. Coetsee S. An overview of bench design for cut slopes with an example of an advanced dataset assessment technique // *Slope Stability 2020: 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering*. 2020, pp. 731-748. DOI: 10.36487/ACG_REPO/2025_47.
22. Технологическая карта на разработку грунта I-II группы в котловане экскаваторами, оборудованными ковшом обратная лопата, с погрузкой в автосамосвалы 62-04 ТК. – М.: ПКТИпромстрой, 2007. – 22 с.
23. Sugawara Y., Chikushi S., Komatsu R., Louhi Kasahara J.Y.Y., Pathak S., Yajima R., Asama H. Visualization of Dump Truck and Excavator in Bird's-eye View by Fisheye Cameras and 3D Range Sensor // *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022, vol. 412, pp. 629-640. DOI: 10.1007/978-3-030-95892-3_47/FIGURES/7.
24. Jongluxmanee J., Yamakita M. Improved soil shape on the dump truck for soil loading operation of excavator // *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*. 2019, vol. July, pp. 845-850. DOI: 10.1109/AIM.2019.8868798.
25. Tips For Digging And Trenching With Your Excavator | Cat | Caterpillar. (n.d.). URL: https://www.cat.com/en_US/articles/for-owners/tips-for-digging-and-trenching-with-your-excavator.html.
26. Wen L., Kim D., Liu M., Lee S. 3D Excavator Pose Estimation Using Projection-Based Pose Optimization for Contact-Driven Hazard Monitoring // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2022, vol. 37(1), pp. 04022048. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0001060.
27. Kejriwal B.K. Safety in mines: a survey of accidents, their cause and prevention (1901 to 2000). 2nd ed. – India: Lovely Prakashan, 2002. – 396 p.
28. Kirin S., Sedmak A., Li W., Brzaković M., Miljanović I., Petrović A., Sedmak S. Human factor risk management procedures applied in the case of open pit mine // *Engineering Failure Analysis*. 2021, vol. 126, pp. 105456. DOI: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2021.105456.
29. Jo B.W., Lee Y.S., Kim J.H., Kim D.K., Choi P.H. Proximity Warning and Excavator Control System for Prevention of Collision Accidents // *Sustainability*. 2017, vol. 9, p. 1488. DOI: 10.3390/SU9081488.

References

1. Flores F.G., Kecskemethy A., Pöttker A. Workspace analysis and maximal force calculation of a face-shovel excavator using kinematical transformers // *12th IFToMM World Congress*. – Besancon, 2007. – P. 375-381.
2. Papachristou A., Valsamos H., Dentsoras A. Optimal Initial Positioning of Excavators in Digging Processes // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2010, vol. 224(7), pp. 835-844. DOI: 10.1243/09596518JSC982.
3. Owolabi A.O. Loading and Haulage Equipment Selection for Optimum Production in a Granite Quarry // *International Journal of Mining Science*. 2019, vol. 5(2), pp. 35-40. DOI: 10.20431/2454-9460.0502004.
4. Santelices G., Pascual R., Lier-Villagra A., Mac Cawley A., Galar D. Integrating mining loading and hauling equipment selection and replacement decisions using stochastic linear programming // *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 2017, vol. 31(1), pp. 52-65. DOI: 10.1080/17480930.2015.1115589.
5. Burt C.N., Caccetta L. Equipment Selection for Surface Mining: A Review // *Interfaces*. 2014, vol. 44(2), pp. 143-162. DOI: 10.1287/inte.2013.0732.
6. Fomin S.I. Foundations for technical solutions in organizing excavation of open ore pits // *Journal of Mining Institute*. 2016, vol. 221, pp. 644-644. DOI: 10.18454/PMI.2016.5.644.
7. Taib M. The Mineral Industry of Algeria [Advance release]. In *2017-2018 Minerals Yearbook*. United States Geological Survey, 2021, p. 12. URL: <https://www.researchgate.net/publication/354167692>.
8. Bugebrine, C., Shibanov, D.A., Mikhailov, A.V. Analysis of the need for rational positioning of excavator // *Technological equipment for mining and oil and gas industry: Proceedings of XXI International Scientific and Technical Conference. Readings in memory of V.R. Kubachek*. – Ekaterinburg: Ural State Mining University, 2023. – P. 30-32.
9. GOST 25137-82 Non-metallic construction materials, crushed stone and dense sand from industrial waste, porous aggregates for concrete. Classification. – М.: State Building Committee of the USSR. 1987. – 7 p.

10. Technical project for field development and reclamation. – URL: <http://www.nedroved.net/wp-content/uploads/proekt-razrabotki-mestorojdeniay.pdf>.
11. Anistratov K. Yu. (Ed.). Open pit mining - The 21st century. Reference book. – Moscow: Sistema maksimum, 2019, vol. 2, 640 p.
12. Peng S.S.. Longwall Mining. CRC Press, 2019. DOI:10.1201/9780429260049.
13. Small C.A., Morgenstern N.R. Performance of a highwall in soft rock, Highvale mine, Alberta // Canadian Geotechnical Journal. 1992, vol. 29(3), pp. 353-363. DOI: 10.1139/t92-041.
14. Chirkov A.S. Extraction and processing of construction rocks. – M.: Publ. house of the Moscow State Mining University, 2001. – 623 p.
15. Pekol A. Evaluation and Risk Analysis of Open-Pit Mining Operations // BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. 2019, vol. 164(6), pp. 232-236. DOI: 10.1007/S00501-019-0854-9.
16. Edwards D.J., Holt G.D. Case study analysis of construction excavator Hamp; S overturn incidents // Engineering, Construction and Architectural Management. 2010, vol. 17(5), pp. 493-511. DOI: 10.1108/09699981011074583/FULL/XML.
17. Lukashuk O.A., Komissarov A.P., Lagunova Y.A. Developing a digital control system for the main drives of an open-pit excavator as a major field of increasing the efficiency of excavator operation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020, vol. 709(2), pp. 022117. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022117.
18. Tyulenev M.A., Zhironkin S.A., Litvin O.I., Tyuleneva E.A., Zhironkina O.V., Markov S.O. Safe and Productive Application of Hydraulic Backhoes in Coal-Bearing Areas of Complex Structured Deposits // Geotechnical and Geological Engineering. 2017, vol. 35(5), pp. 2065-2077. DOI: 10.1007/S10706-017-0228-6/FIGURES/8.
19. Poniewierski J. Guidelines and considerations for open pit designers. 2018, p. 16. DOI: 10.13140/RG.2.2.24925.46563.
20. Maleki M.R., Mahyar M., Meshkabadi K. Design of Overall Slope Angle and Analysis of Rock Slope Stability of Chadormalu Mine Using Empirical and Numerical Methods // Engineering. 2011, vol. 3(9), pp. 965-971. DOI: 10.4236/ENG.2011.39119.
21. Coetsee S. An overview of bench design for cut slopes with an example of an advanced dataset assessment technique // Slope Stability 2020: 2020 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering. 2020, pp. 731-748. DOI: 10.36487/ACG_REPO/2025_47.
22. Technological map for the development of the I-II group soil in the trench by excavators, equipped with backhoe bucket, with loading into dump trucks 62-04 TK. – M.: PKTIpromstroi, 2007. – 22 p.
30. Sugasawa Y., Chikushi S., Komatsu R., Louhi Kasahara J.Y.Y., Pathak S., Yajima R., Asama H. Visualization of Dump Truck and Excavator in Bird's-eye View by Fisheye Cameras and 3D Range Sensor // Lecture Notes in Networks and Systems. 2022, vol. 412, pp. 629-640. DOI: 10.1007/978-3-030-95892-3_47/FIGURES/7.
31. Jongluxmanee J., Yamakita M. Improved soil shape on the dump truck for soil loading operation of excavator // IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM. 2019, vol. July, pp. 845-850. DOI: 10.1109/AIM.2019.8868798.
32. Tips For Digging And Trenching With Your Excavator | Cat | Caterpillar. (n.d.). URL: https://www.cat.com/en_US/articles/for-owners/tips-for-digging-and-trenching-with-your-excavator.html.
33. Wen L., Kim D., Liu M., Lee S. 3D Excavator Pose Estimation Using Projection-Based Pose Optimization for Contact-Driven Hazard Monitoring // Journal of Computing in Civil Engineering. 2022, vol. 37(1), pp. 04022048. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0001060.
34. Kejriwal B.K. Safety in mines: a survey of accidents, their cause and prevention (1901 to 2000). 2nd ed. – India: Lovely Prakashan, 2002. – 396 p.
35. Kirin S., Sedmak A., Li W., Brzaković M., Miljanović I., Petrović A., Sedmak S. Human factor risk management procedures applied in the case of open pit mine // Engineering Failure Analysis. 2021, vol. 126, pp. 105456. DOI: 10.1016/J.ENGFAILANAL.2021.105456.
23. Jo B.W., Lee Y.S., Kim J.H., Kim D.K., Choi P.H. Proximity Warning and Excavator Control System for Prevention of Collision Accidents // Sustainability. 2017, vol. 9, p. 1488. DOI: 10.3390/SU9081488.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Бугебрин Шуаиб – аспирант	Bouguebrine Chouaib – postgraduate student
Соловьев Иван Васильевич – аспирант	Soloviev Ivan Vasilievich – postgraduate student
Михайлов Александр Викторович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры машиностроения	Mikhailov Alexander Viktorovich – doctor of technical sciences, professor, professor of mechanical engineering Department
s223100@stud.spmi.ru	

Получена 05.06.2023