

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТИПА ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ КАРЬЕРНЫХ АВТОДОРОГ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ АВТОСАМОСВАЛА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

И. А. Пыталев, В. В. Якшина, А. К. Артюшин, П. А. Маренков

*Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
г. Магнитогорск, Российская Федерация*

Аннотация: Применение дорожной одежды карьерных дорог с более высоким коэффициентом сцепления позволяет повысить производительность автосамосвалов. Исследованы используемые на карьерах типы дорожных полотен с разным коэффициентом сцепления. Проведена серия экспериментов движения автосамосвала в имитационной модели для условия заданного маршрута следования с различными типами дорожных одежд как на протяжении всего маршрута следования автосамосвала, так и с разделением категорий дорожных одежд на временных и постоянных дорогах. Приведены результаты сравнения и сделаны выводы о влиянии дорожного покрытия на производительность автосамосвала.

Ключевые слова: геотехнология, строительные материалы, открытые горные работы, имитационное моделирование, автосамосвал, дорожное полотно, карьерные автодороги, коэффициент сцепления, типы дорожной одежды

Для цитирования: Пыталев И. А., Якшина В. В., Артюшин А. К., Маренков П. А. Исследования влияния типа дорожной одежды карьерных автодорог на производительность автосамосвала при использовании имитационного моделирования // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 4. С. 62-66. https://doi.org/10.56195/20793332_2024_4_62_66.

STUDIES OF THE INFLUENCE OF THE PAVEMENT OF QUARRY ROADS ON THE PERFORMANCE OF A DUMP TRUCK USING SIMULATION MODELING

I. A. Pytalev, V. V. Yakshina, A. K. Artyushin, P. A. Marenkov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

Abstract: The use of pavement with a higher coefficient of adhesion allows to increase the productivity of dump trucks, however, the difference in performance and the consequent validity of the use of more expensive materials in the construction of quarry roads are poorly studied. In the article, the roadways used in quarries with different coefficient of adhesion were selected. A number of experiments have been carried out, in a simulation model, simulating the movement of a dump truck along the same route, but with different types of road clothes, both throughout the entire route of the dump truck, and with the separation of categories of clothes on temporary and permanent roads. The results of the comparison were carried out and conclusions were drawn about the impact of the road surface on the performance of the dump truck.

Keywords: geotechnology, building materials, open-pit mining, simulation modeling, dump truck, roadbed, quarry roads, coefficient of adhesion, types of dor

For citation: Pytalev I. A., Yakshina V. V., Artyushin A. K., Marenkov P. A. Studies of the influence of the pavement of quarry roads on the performance of a dump truck using simulation modeling. Mine Surveying and Subsoil Use. 2024;(4):62-66. (In Russ.). https://doi.org/10.56195/20793332_2024_4_62_66.

Введение

Окружающая среда и характеристики дорожных покрытий оказывают значительное влияние на сцепные качества покрытий карьерных дорог, режим и безопасность движения грузового транспорта как отдельных автосамосвалов, так и всего передвигающегося транспорта по карьерным дорогам.

Безопасность движения карьерных автосамосвалов определяется основными технико-эксплуатационными показателями автомобильных дорог [1]. К числу таких показателей, в частности, относятся ровность и шероховатость дорожного покрытия, влияющие на коэффициент сцепления. Существенное влияние на величину коэффициента сцепления

оказывают скорость движения транспортного средства, состояние протекторов шин, неровности дороги, давление и температура в шинах и т. д. Это в свою очередь приводит к разным показателям работы карьера [2–5].

При эксплуатации стационарных дорог рекомендуется применять дорожные одежды первой и второй категории, в то время как современные горнодобывающие предприятия применяют либо щебеночные и гравийные материалы, либо строят грунтовые дороги. Это обосновано более низкой стоимостью строительства и эксплуатации таких дорог. Однако влияние таких решений мало изучено.

Перспективные направления, обеспечивающие повышение производительности автосамосвалов при транспортировании горной массы:

- повышение качества шин автосамосвала;
- оптимизация путей следования автосамосвала;
- разработка и применение дорожного полотна высокого качества;
- определение типа дорожного покрытия при строительстве участка дороги.

Значительное количество влияющих параметров существенно усложняет проведение натурных экспериментов, что повышает востребованность применения модельных экспериментов.

Цель исследования: обосновать влияние типа дорожной одежды карьерных автодорог на производительность автосамосвалов.

Методы исследования

Для определения влияния типа дорожной одежды на производительность карьерных автосамосвалов применялся метод имитационного моделирования. В качестве среды для производства серии экспериментов использовался программный продукт AnyLogic.

Результаты исследований

На общий ресурс работы автосамосвала, а также его производительность, помимо своевременного обслуживания, влияет характеристика дорожной сети карьера. Для оценки влияния типа дорожного полотна на производительность автосамосвала было проведено имитационное моделирование работы автосамосвала в карьере.

Необходимая имитационная модель представляла собой цикличную работу автосамосвала в карьере, т. е. погрузку автосамосвала, движение между пунктами погрузки-выгрузки, выгрузку автосамосвала на определенном промежутке времени. Также модель учитывала влияние технических характеристик автосамосвала и характеристики карьера, тем самым позволяла проводить учет физических явлений.

План экспериментов заключался в проведении моделирования работы одного автосамосвала по одинаковому кольцевому маршруту для каждого типа покрытия дорожного полотна на протяжении суток. Таким образом, единственным параметром при проведении моделирования был коэффициент сцепления.

Исследование проводилось в системе имитационного моделирования AnyLogic [6]. Программная платформа AnyLogic позволяет строить имитационные модели разного уровня обобщения и сложности, поскольку сочетает все современные парадигмы имитационного моделирования, включая дискретно-событийную и агентную.

В качестве имитационной модели, на которой производилось моделирование, была выбрана модель работы экска-

ваторно-самосвального комплекса, предложенная в работе «Исследование зависимости эффективности экскаваторно-самосвального комплекса от скоростного профиля автосамосвалов с использованием имитационного моделирования» [7].

Данная модель позволяет учитывать влияние на скорость движения транспортного средства таких факторов, как: технические характеристики автосамосвала и характеристики карьерной дороги. Это в свою очередь позволяет модели автосамосвала вести расчет скорости и ускорения в каждый момент модельного времени в зависимости от продольного уклона трассы автодороги и коэффициента сцепления шины с дорожным полотном. Скорость автосамосвала в модели изменяется динамически с использованием уравнения расчета скорости через равноускоренное или равнозамедленное движение, где в качестве нулевой скорости используется текущая скорость, а ускорение определяется с учетом текущего продольного уклона трассы автодороги и коэффициента сцепления дорожной одежды, по которой следует автосамосвал в данный момент.

Согласно СП 37.13330.2012 «Промышленный транспорт», автомобильные дороги в карьере разделяются на капитальные (постоянные) и временные [9]. Капитальные дороги сооружаются на стационарных участках трассы на поверхности карьера, в траншеях и транспортных бермах. Временными являются забойные дороги в забоях, на рабочей площадке, скользящих съездах и отвалах.

Различают дорожные покрытия усовершенствованные (капитальные и облегченные), переходные и низшие.

К усовершенствованным капитальным покрытиям относятся цементобетонные (монолитные и сборные) и асфальтобетонные, укладываемые в горячем состоянии из прочных щебеночных материалов, обработанных вязкими битумами.

К усовершенствованным облегченным относятся покрытия из щебеночных и гравийных материалов, обработанных жидкими органическими вяжущими материалами, из холодного асфальтобетона, грунта, обработанного вяжущими битумами.

К переходным покрытиям относят щебеночные из каменных материалов и шлака, грунтощебеночные и гравийные, из грунта и местных слабых минеральных материалов, обработанных жидкими вяжущими органическими веществами. Покрытия переходного типа являются основаниями для усовершенствованных покрытий.

Низшие покрытия — это грунтовые, укрепленные различными местными материалами.

На временных забойных и отвальных дорогах обычно устраивается однослойная дорожная одежда из выровненной горной массы с подсыпкой щебеночного или гравийного материала. Для временных съездов соединительных и хозяйственных дорог устраивается однослойное покрытие из гравия или взорванной скальной вскрыши слоем в несколько десятков сантиметров, которая разравнивается бульдозерами и автогрейдером и укатывается движущимися автомобилями.

Из капитальных покрытий распространение нашли железобетонные и цементобетонные покрытия, которые обладают высокой износостойкостью и удовлетворительными характеристиками по сцеплению.

Устойчивость и управляемость автомобиля, его тяговые свойства и тормозные характеристики в значительной степени определяются сцеплением шины с дорогой. Величина его зависит главным образом от типа и состояния покрытия дороги, поэтому ряд научных работ, в которых производилось измерение коэффициента сцепления на карьерных автодо-

рогах, а также дорогах общего пользования показывают, что при снижении класса дорожной одежды снижается коэффициент сцепления [7–10].

Так, в имитационной модели были использованы значения коэффициентов для конкретного случая, которые приведены в таблице.

Таблица / Table

Значения коэффициента сцепления в зависимости от состояния и вида дорожного покрытия
Values of the coefficient of adhesion depending on the condition and type of surface coating

Тип дорожной одежды	Коэффициент сцепления (ϕ)
I-к, II-к (асфальтобетон)	0,7 ÷ 0,85
III-к (щебеночные и гравийные смеси)	0,4 ÷ 0,7
IV-к (выравненный скальный грунт)	0,2 ÷ 0,5

Для проведения экспериментов в модели применяли исходные данные:

1. Период моделирования составляет 24 часа с учетом времени на смену водителей и проверку автосамосвала перед сменой (суммарно 1 час).
2. Время погрузки и выгрузки за один оборот автосамосвала составляет 30 минут.
3. В качестве карьерного автосамосвала выбран БелАЗ серии 7540 [11].
4. Протяженность пути между забоем и отвалом составляет 9,8 км.
5. Руководящий уклон (средний продольный уклон) дороги составляет 7 градусов (122,8 %).

На рисунке 1 приведен график основных показателей работы автосамосвала за один оборот при разных категориях дорожных одежд, а соответственно, и разных коэффициентов сцепления.

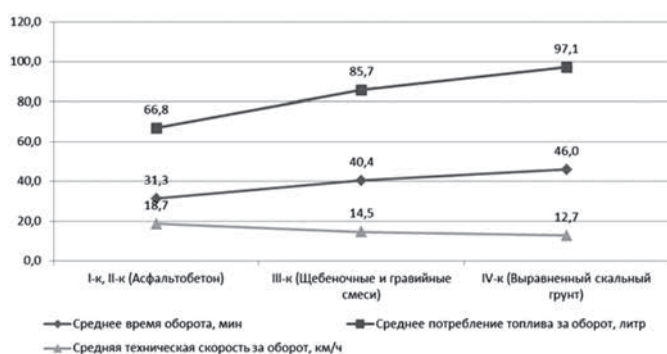


Рис. 1. График основных показателей работы автосамосвала за один оборот при разных категориях дорожных одежд

Fig. 1. The schedule of the main indicators of the dump truck in one turn, with different categories of road clothes

Так, при транспортировании горной массы автосамосвалом по асфальтированной дороге значения средней технической скорости автосамосвала составляло 18,7 км/ч, что на 28,6 % и на 46,3 % больше, чем при движении по щебе-

ночному и гравийному покрытию или движении по выравненному скальному грунту, со значениями 14,5 и 12,7 км/ч соответственно. Такие значения скорости приводят к тому, что время оборота автосамосвала также имеет тренд на уменьшение при использовании дорожного покрытия более высокой категории при условии, что такие влияющие на фактор показатели, как постановка на погрузку/выгрузку и сама погрузка/выгрузка, определены константными значениями. Так, разница во времени оборота между дорожным покрытием из асфальтобетона и щебеночным и гравийным покрытием составила 22,5 %, а между дорожным покрытием из асфальтобетона и покрытием из выравненного скального грунта — 31,8 %.

Полученные значения расхода топлива в зависимости от класса дороги показывают, что на асфальтобетонной дороге автосамосвал будет потреблять меньше топлива по сравнению с грунтовой или гравийной, что может позволить сократить затраты на топливо.

На рисунке 2 представлены результаты работы автосамосвала в течение суток.



Рис. 2. График основных показателей работы автосамосвала за 24 часа при разных категориях дорожных одежд

Fig. 2. The schedule of the main indicators of the dump truck for 24 hours, with different categories of road clothes

Из рисунка 2 видно, что при эксплуатации автосамосвала по дороге с асфальтовым покрытием увеличится число оборотов, а соответственно, и объем перевезенной горной массы. Так, при транспортировании по асфальтобетонной дороге прирост перевезенной горной массы по сравнению с щебеночным и выравненным скальным грунтом покрытием будет составлять 15 и 27,8 % соответственно.

Заключение

Проведенные эксперименты и анализ их результатов позволяют сделать вывод о том, что показатели работы автосамосвала на карьере при различных типах дорожных одежд имеют следующую закономерность: при увеличении коэффициента сцепления шин с дорогой наблюдается повышение показателей транспортной работы автосамосвала.

Таким образом, использование дорожного полотна более высокого класса позволяет повысить производительность всего экскаваторного и автосамосвального парка, что существенно обеспечивает рост эффективности горнодобывающего предприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стенин, Ю. В. Карьерные автодороги — их значимость и проблемы совершенствования / Ю. В. Стенин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2009. — № 9. — С. 361–367.
2. Zhuravlev, A. G. Computer modeling when assessing the impact of road factors on performance of quarry vehicles / A. G. Zhuravlev, V. V. Chernykh // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. — 2023. — Vol. 334, № 12. — P. 20–31.
3. Three-dimensional finite element modeling of haul road response to ultra-large dump truck dynamic loading / B. A. Kansake [et al.] // Mining, Metallurgy & Exploration. — 2023. — Vol. 40, № 1. — P. 315–335.
4. Improving materials logistics plan in road construction projects using discrete event simulation / A. Alvanchi [et al.] // Engineering, Construction and Architectural Management. — 2021. — Vol. 28, № 10. — P. 3144–3163.
5. Kansake, B. A. Analytical modelling of dump truck tire dynamic response to haul road surface excitations / B. A. Kansake, S. Frimpong // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. — 2020. — Vol. 34, № 1. — P. 1–18.
6. Any Logic Simulation Software. — URL: <https://www.anylogic.com/>.
7. Artyushin, A. K. Investigation of the dependence of the efficiency of the excavator-dump complex on the high-speed profile of dump trucks using simulation modeling / A. K. Artyushin, A. N. Rakhmangulov // Transport Problems — 2021: Proceedings XII International Scientific Conference, X International Symposium of Young Researchers Under the Honorary Patronage of Mayor of Katowice City and Rector of Silesian University of Technology. — Katowice, 2021. — P. 32–47.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023612706 Российская Федерация. Программа расчета суммарного и удельного расхода топлива автосамосвалов с учетом руководящего уклона карьерных автодорог: № 2023611124: заявл. 26.01.2023; опубл. 07.02.2023 / А. К. Артюшин, И. А. Пыталев, В. В. Якшина [и др.]; заявитель: ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова».
9. СП 37.13330.2012 Промышленный транспорт. Актуализированная редакция СНиП 2.05.07-91 (с Изменениями 1-6) [Электронный ресурс]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095520> (дата обращения: 08.08.2024).
10. Евтюков, С. А. Влияние факторов на сцепные качества покрытий автомобильных дорог / С. А. Евтюков // Современные проблемы науки и образования. — 2012. — № 3. — С. 97.
11. Зависимость коэффициента сцепления от шероховатости дорожного покрытия / А. А. Васильев, Л. Н. Горин, Д. Н. Игошин, М. М. Ильин // Вестник НГИЭИ. — 2014. — № 10 (41). — С. 32–37.
12. Горшков, Э. В. Исследование коэффициента сцепления колеса автомобиля с покрытием карьерных автодорог / Э. В. Горшков, А. П. Тарасов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2008. — № 8. — С. 330–343.
13. Соустова, Л. И. Определение коэффициента сцепления колеса с дорогой расчетно-экспериментальным путем / Л. И. Соустова, И. Ю. Чуйко // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. — 2019. — № 2 (62). — С. 68–77.
14. Евтюков, С. А. Параметры, влияющие на сцепные качества покрытий автодорог / С. А. Евтюков, С. С. Евтюков // Вестник Тувынского государственного университета. — 2013. — № 3 (18). — С. 75–82.
15. BELAZ-7540 Series Mining Dump Trucks. — URL: <https://belaz.by/en/products/products-belaz/dumpers/dump-trucks-with-hy-dromechanical-transmission/dump-truck-series-7540/>.

REFERENCES

1. Stenin YuV. Career highways their significance and problems of improvement. GIAB. 2009;9:361-67 (In Russ.).
2. Zhuravlev AG, Chernykh VV. Computer modeling when assessing the impact of road factors on performance of quarry vehicles. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University Geo Assets Engineering. 2023;334(12):20-31.
3. Kansake BA. et al. Three-dimensional finite element modeling of haul road response to ultra-large dump truck dynamic loading. Mining, Metallurgy & Exploration. 2023;40(1): 315-35.
4. Alvanchi A. et al. Improving materials logistics plan in road construction projects using discrete event simulation. Engineering, Construction and Architectural Management. 2021;28(10):3144-63.
5. Kansake BA, Frimpong S. Analytical modelling of dump truck tire dynamic response to haul road surface excitations. International Journal of Mining, Reclamation and Environment. 2020;34(1):1-18.
6. AnyLogic Simulation Software. Available from: <https://www.anylogic.com/>.
7. Artyushin AK, Rakhmangulov AN. Investigation of the dependence of the efficiency of the excavator-dump complex on the high-speed profile of dump trucks using simulation modeling. Transport Problems — 2021: Proceedings XII International Scientific Conference, X International Symposium of Young Researchers Under the Honorary Patronage of Mayor of Katowice City and Rector of Silesian University of Technology, Katowice, June 29-30, 2021. — Katowice: Silesian University of Technology, 2021:32-47.
8. Certificate of state registration of the computer program No. 2023612706 Russian Federation. The program for calculating the total and specific fuel consumption of dump trucks, taking into account the guiding slope of quarry roads: No. 2023611124 : application 26.01.2023 : publ. 07.02.2023 / A. K. Artyushin, I. A. Pytalev, V. V. Yakshina [et al.]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Magnitogorsk State Technical University named after G. I. Nosov" (In Russ.).
9. SP 37.13330.2012 Industrial transport. Updated edition of SNiP 2.05.07-91 (with Amendments N 1-6). Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200095520> (In Russ.).
10. Evtyukov SA. Influence of factors on the coupling qualities of road coverings. Modern problems of science and education. 2012;3:97 (In Russ.).
11. Vasiliev AA, Gorin LN, Igoshin DN, et al. Dependence of the coefficient of adhesion on the roughness of the road surface. Bulletin of the NGIEI. 2014;10(41):32-7 (In Russ.).
12. Gorshkov EV, Tarasov AP. Investigation of the coefficient of adhesion of a car wheel with a coating of quarry roads. GIAB. 2008;9:330-43 (In Russ.).

13. Soustova LI, Chuiko IYu. Determination of the coefficient of adhesion of a wheel with a road by calculation and experimentation. Modern technologies. System analysis. Modeling. 2019;2:68-77 (In Russ.).
14. Yevtyukov SA, Yevtyukov SS. Parameters affecting the coupling qualities of covered roads. Bulletin of Tuva State University. Technical and physical and mathematical sciences. 2013;3:75-82 (In Russ.).
15. BELAZ-7540 Series Mining Dump Trucks. Available from: <https://belaz.by/en/products/products-belaz/dumpers/dump-trucks-with-hydronechanical-transmission/dump-truck-series-7540>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пыталев Иван Алексеевич –

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры разработки месторождений полезных ископаемых, директор института горного дела и транспорта Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: pytalev_ivan@mail.ru

Якшина Виктория Владимировна –

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: v.v.yakshina@inbox.ru

Артюшин Андрей Константинович –

аспирант кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: andrey.art.1999@mail.ru

Маренков Павел Андреевич –

соискатель кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова, г. Магнитогорск, Российская Федерация, e-mail: igdit@mail.ru

Критерии авторства / Contribution:

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

Конфликт интересов / Conflict of interest:

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

ABOUT THE AUTHORS

Ivan A. Pytalev –

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mineral Resources Development, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: pytalev_ivan@mail.ru

Viktoriya V. Yakshina –

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Mineral Deposits Development, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: v.v.yakshina@inbox.ru

Andrey K. Artyushin –

Postgraduate Student of the Department of Mineral Deposits Development, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: andrey.art.1999@mail.ru

Pavel A. Marenkov –

Candidate of the Department of Mining of Mineral Deposits, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation, e-mail: igdit@mail.ru