

Взвешивание самосвалов как инструмент повышения эффективности эксплуатации погрузочно-доставочной техники

С.А. Лавренко¹✉, В.В. Шорников¹, Е.Ю. Ботян¹, А.Е. Пушкарев², И.В. Шмидт³

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ ООО «МАЕ», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ lavrenko_sa@pers.spmi.ru

Резюме: В настоящее время на большинстве месторождений твердых полезных ископаемых в качестве ключевого вида транспорта, призванного обеспечить необходимый по горной массе грузопоток, применяют большегрузные карьерные автосамосвалы. Одной из основных задач, возникающих при их эксплуатации, является учет и контроль перевезенной горной массы, причем не только ее веса, но и распределения по объему кузова. Пренебрежение этими аспектами или же недостаточно точная их оценка приводят к негативным последствиям при достижении плановых показателей различных служб, а также к снижению надежности элементов самосвалов, воспринимающих основные нагрузки. В данном исследовании представлен опыт использования специализированных весов, посредством которых в течение двух недель происходило взвешивание карьерных автосамосвалов на одном из предприятий по добыче железной руды открытым способом. Помимо этого, на основе полученной информации были разработаны рекомендации по практическому применению подобных весов, что позволило повысить эффективность эксплуатации этого вида машин.

Ключевые слова: погрузчик, экскаватор, карьерный автосамосвал, горная масса, транспортная система, горное предприятие

Для цитирования: Лавренко С.А., Шорников В.В., Ботян Е.Ю., Пушкарев А.Е., Шмидт И.В. Взвешивание самосвалов как инструмент повышения эффективности эксплуатации погрузочно-доставочной техники. *Горная промышленность*. 2025;(1S):81–85. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-81-85>

Weighing of dump trucks as a tool to improve the operating efficiency of loading and hauling equipment

S.A. Lavrenko¹✉, V.V. Shornikov¹, E.Yu. Botyan¹, A.E. Pushkarev², I.V. Shmidt³

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

³ MAE LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ kortiev73@mail.ru

Abstract: Heavy-duty mining dump trucks are currently used at most solid mineral deposits as the key means to ensure the required rock material flow. One of the main tasks arising in their operation is to track and control the transported rock mass, not only by its weight, but also by its distribution over the dump truck box. Neglecting these aspects as well as not assessing them accurately enough, leads to a number of adverse consequences, both in meeting the targets of the various services and in reducing the reliability of the main load bearing elements of the dump trucks. This study describes the experience of applying dedicated scales, which were used to weigh mining dump trucks for two weeks at one of the open pit iron ore mining companies. In addition, based on the information obtained, recommendations for practical application of such scales were developed to improve the operating efficiency of this type of machines.

Keywords: loader, excavator, mining dump truck, rock mass, transportation system, mining company

For citation: Lavrenko S.A., Shornikov V.V., Botyan E.Yu., Pushkarev A.E., Shmidt I.V. Weighing of dump trucks as a tool to improve the operating efficiency of loading and hauling equipment. *Russian Mining Industry*. 2025;(1S):81–85. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-1S-81-85>

Введение

В данный момент ведущими горнодобывающими компаниями реализуется ряд проектов, направленных на снижение себестоимости выпускаемой продукции по-

средством увеличения объемов добычи полезного ископаемого [1], отработки трудноизвлекаемых запасов [2], а также повышения эффективности эксплуатации используемой техники [3–5].

В ряде исследований отмечалось, что в структуре себестоимости добычи полезного ископаемого ключевым аспектом являются расходы на его транспортирование, составляя по разным оценкам от 45 до 70% от общих затрат [6; 7]. Наиболее широко используемым видом транспорта при отработке месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом являются карьерные автосамосвалы, которые обеспечивают до 80% всего грузопотока по горной массе [8]. Этот вид транспорта применяется в составе комплексов с выемочной и погрузочно-доставочной техникой, которые осуществляют загрузку кузова полезным ископаемым или вскрышными породами с целью их дальнейшей доставки на обогатительную фабрику, промежуточный склад руды или отвал пустых пород [9; 10]. При использовании такой технологической схемы контроль веса и геометрии горной массы в кузове автосамосвала становится одной из наиболее значимых задач, стоящих перед профильными службами предприятия. Пренебрежение им приводит к целому ряду указанных ниже негативных последствий:

- недостаточно точная оценка показателей производительности техники не позволяет контролировать фактическое выполнение производственного плана [11];
- нарушение ритмичности в работе обогатительной фабрики, вызванное значительно варьирующимся количеством поступающей руды, приводит к простоям оборудования;
- снижение ресурса элементов конструкции самосвалов, в первую очередь – рамы, подвески, крупногабаритных шин, тормозной системы, которые и воспринимают основные нагрузки, возникающие от существенных превышений целевой загрузки, приводит к дополнительным затратам на ремонт и простои оборудования [12; 13].

Кроме того, все указанные выше проблемы ведут к увеличению себестоимости ведения погрузочно-доставочных работ на горном предприятии, что резко снижает его экономическую эффективность. Несмотря на достаточную распространённость обозначенной проблемы, до недавнего времени не существовало инструментов контроля загрузки автосамосвалов, отличных от визуального контроля операторами погрузочной техники и/или горными мастерами [14].

Ситуация стала меняться в лучшую сторону с внедрением автоматизированных систем управления горнотранспортными комплексами (АСУ ГТК), благодаря чему появилась возможность оперативно получать и анализировать данные по весу перевозимой автосамосвалами горной массы. При этом необходимо отметить, что работа модуля контроля веса перевозимой горной массы, передающего данные в АСУ ГТК, зачастую основана на изменении давления в цилиндрах подвески автосамосвалов.

Среди прочих инструментов, способствующих контролю и учету перевозимой горной массы, также был разработан ряд устройств, таких как платформы для взвешивания автосамосвалов, рамки с TVS-сканерами и т.п. [15–17]. Каждый из них в той или иной степени на отдельных предприятиях был имплементирован в существующие технологические процессы, связанные с транспортированием горной массы, однако комплексной оценки их применимости на каждом технологическом этапе до настоящего времени проведено не было.

Методология исследования

Как было сказано ранее, загрузка карьерных самосвалов является наиболее значимым фактором, влияющим

на срок службы основных узлов и агрегатов машины. При этом в технической документации по автосамосвалам, разрабатываемой заводом-изготовителем, зачастую приводятся сразу две величины, имеющие непосредственное отношение к грузоподъемности самосвала: полная разрешенная масса (ПРМ) и целевая грузоподъемность (ГПц). Они связаны между собой следующим образом:

$$\text{ГПц} = \text{ПРМ} - \text{МП} = \text{ПРМ} - (\text{Мс} + \text{Мж} + \text{ВО}), \quad (1)$$

где МП – масса порожнего самосвала, т; Мс – собственная масса самосвала, т; Мж – масса залитых в самосвал гидравлических жидкостей и топлива, т; ВО – масса оператора, т.

Как видно из формулы (1), масса порожнего самосвала (МП) с течением времени может изменяться. Эти изменения, вызванные изменением массы футеровки кузова за счет ее постепенного истирания или наваривания дополнительных пластин, расходом или доливом гидравлических жидкостей и топлива, налипанием кусков перевозимой горной массы на кузов или элементы конструкции самосвала, могут достигать 10–15 т. Поэтому будет изменяться и значение целевой грузоподъемности (ГПц). Учитывая вероятностный характер загрузки автосамосвала, подчиняющийся нормальному закону распределения, ведущие производители горной техники рекомендуют определять ее допустимые пределы на основании фактического значения целевой грузоподъемности по «Правилу 10/10/20» [17–19].

Еще раз отметим, что для контроля этих показателей на большинстве горных предприятий в настоящее время используются данные, поступающие в АСУ ГТК с модуля контроля веса перевозимой горной массы. Однако, как показывает серия проведенных в исследовании опытов, с течением времени показания этих модулей все больше начинают отклоняться от фактических. Причем как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения, а диапазон таких колебаний может составлять ±40–50%. Среди причин возникновения таких отклонений можно назвать несвоевременную регулировку и калибровку подвесок самосвала, поломку или некорректную работу установленных в подвесках датчиков давления, сильное смещение центра масс перевозимого груза к козырьку или хвостовику кузова самосвала и т.д.

Таким образом, с целью более точного учета перевезенной горной массы, соответствия фактических значений полной разрешенной массы и целевой загрузки самосвала и значений, установленных заводом-изготовителем, необходимо с определенной периодичностью производить внешний весовой контроль массы порожнего самосвала и его загрузки. Также это требуется при апробации новых моделей самосвалов в полевых условиях, анализе точности работы используемых на предприятии систем взвешивания или исследовании эксплуатационных показателей работы машин [20].

Для проведения подобных исследований было использовано уникальное оборудование компании ООО «М4Е» – крупногабаритные весы TranscaleAF-400 (Австралия), основные технические характеристики которых представлены ниже:

- диапазон взвешивания – от 0,1 до 400 т;
- погрешность взвешивания в статике – до 1%;
- погрешность взвешивания в динамике – до 2%;
- температура эксплуатации – от –30 до +60 °С;
- имеется защита от вибрации, влаги и пыли.



Рис. 1
Монтаж платформ весов

К преимуществам данных весов относятся возможность их транспортирования тралами по дорогам общего пользования, простота монтажа и демонтажа, высокая точность измерения, возможность получать данные в режиме реального времени (рис. 1).

Платформы этих весов могут быть установлены на любую твердую горизонтальную поверхность, при этом разница по высоте между любыми двумя точками обеих платформ не должна превышать ± 20 мм. После установки весов необходимо провести контрольный тест точности проводимых измерений и убедиться в том, что их погрешность не превышает 1%.

Во время проведения измерений при помощи весов Transcale AF-400, выполненных как для груженых, так и для порожних самосвалов, была определена нагрузка, приходящаяся на каждую из четырех точек: левое переднее колесо, правое переднее колесо, левая задняя пара колес, правая задняя пара колес. Благодаря полученным значениям появилась возможность определить не только нагрузку, приходящуюся на переднюю и заднюю оси самосвала, но и рассчитать расположение центра масс груза в кузове, а также – проанализировать продольные, поперечные и скручивающие нагрузки, воздействующие на раму самосвала.

Результаты исследований и их обсуждение

На основании проведенных исследований было установлено, что на точность показаний модуля контроля веса перевозимой горной массы, передаваемых в АСУ ГТК, существенное влияние оказывает расположение центра масс груза в кузове, а также правильная и своевременная настройка и калибровка подвесок автосамосвалов, с которых снимаются первоначальные данные для определения массы перевозимого груза.

Благодаря полученным в ходе проведенных испытаний данным был разработан ряд следующих рекомендаций:

1. *Контроль и оптимизация загрузок самосвалов.* Фактическая грузоподъемность, определенная натурным взвешиванием, позволяет более точно соблюдать рекомендации производителя по использованию грузоподъемности самосвалов и избегать опасных перегрузов, что снижает аварийность и оптимизирует производительность.

2. *Увеличение срока службы рамы и компонентов.* Замена кузова или его дополнительная футеровка приводят к тому, что применяемый паспорт загрузки самосвала становится неактуальным, а сам самосвал работает с существенными перегрузками. Проведение натурного взвешивания позволяет скорректировать паспорт загрузки и существенно уменьшить вероятность возникновения за-



Fig. 1
Installation of the weighing platforms

пределных нагрузок на раму и другие компоненты самосвала, что значительно увеличит срок их службы.

3. *Увеличение срока службы шин.* Из соображений равномерной нагрузки на шины и силовые элементы конструкции самосвала следует стремиться к тому, чтобы на переднюю ось приходилось 33% от общей массы груженого самосвала, на заднюю ось – 67%, на правую и левую стороны – по 50%. Натурное взвешивание позволяет выявлять отклонения от нормы и оперативно принимать корректирующие меры, что в итоге приведет к увеличению ходимости шин и ресурса основных силовых элементов машины.

4. *Оценка квалификации операторов погрузочных машин.* Оценка правильности распределения груза в кузове самосвала – это один из способов оценки квалификации операторов погрузочных единиц. Выявление фактов неправильной погрузки при помощи натурного взвешивания дает четкий сигнал о необходимости проведения дополнительного обучения персонала.

Заключение

Результатом проведенного исследования является следующее:

1) Установлено наличие зависимости между расположением центра масс груза в кузове самосвала и точностью показаний модуля контроля веса перевозимой горной массы;

2) Обоснована необходимость регулярного проведения взвешивания парка самосвалов горных предприятий стационарными поверенными весами для установления точных значений массы перевозимого груза и ее соответствия значениям разрешенной полной массы самосвала и целевой загрузки;

3) Даны рекомендации по контролю и оптимизации загрузок самосвалов, увеличению срока службы рамы, силовых элементов и шин самосвалов, что приведет к повышению экономической эффективности их эксплуатации.

В рамках дальнейших исследований будут представлены результаты применения оборудования для взвешивания и сканирования при решении задач по установлению влияния веса и геометрии «шапки» перевозимой горной массы на надежность основных несущих узлов и агрегатов карьерных автосамосвалов, оценке корректности соблюдения паспортов их загрузки, а также определению их топливной эффективности.

Вклад авторов

С.А. Лавренко – анализ и обработка полученных материалов, постановка цели и задач исследования.

В.В. Шорников – написание текста статьи, обоснование методики и непосредственное проведение полевых исследований.

Е.Ю. Ботян – написание текста статьи, анализ существующих исследований по теме.

А.Е. Пушкарев – генерация идеи.

И.В. Шмидт – организация и проведение полевых исследований.

Authors' contribution

S.A. Lavrenko – analyzing and processing of the obtained materials, setting the goal and objectives of the study.

V.V. Shornikov – writing the text of the article, justification of the methodology and immediate execution of field studies.

E.Yu. Botyan – writing the text of the article, analyzing the existing research materials on the topic.

A.E. Pushkarev – generation of the idea.

I.V. Shmidt – organizing and conduction of field studies.

Список литературы / References

- Ivanov V. V, Sidorenko S. A, Sidorenko A. A. Justification of the method for determination the optimum performance of limestone quarry for steel and cement production. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2015;12(2):1797–1803. Available at: <https://www.biotech-asia.org/vol12no2/justification-of-the-method-for-determination-the-optimum-performance-of-limestone-quarry-for-steel-and-cement-production/> (accessed: 12.01.2025).
- Гаращенко Ж.М., Теремецкая В.А., Габов В.В. Отработка угольных целиков унифицированными выемочными модулями локальными забоями. *Горная промышленность*. 2024;(5S):151–157. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-151-157>
Garashchenko Zh.M., Teremetskaya V.A., Gabov V.V. Mining of coal pillars using unified excavation modules with local faces. *Russian Mining Industry*. 2024;(5S):151–157. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-151-157>
- Safiullin R., Efremova V., Ivanov B. The method of multi-criteria evaluation of the effectiveness of the integrated control system of a highly automated vehicle. *The Open Transportation Journal*. 2024;18:e18744478309909. <https://doi.org/10.2174/0118744478309909240807051315>
- Матрохина К.В., Трофимец В.Я., Мазакоев Е.Б., Маховиков А.Б., Хайкин М.М. Развитие методологии сценарного анализа инвестиционных проектов предприятий минерально-сырьевого комплекса. *Записки Горного института*. 2023;259:112–124. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.3>
Matrokhina K.V., Trofimets V.Y., Mazakov E.B., Makhovikov A.B., Khaykin M.M. Development of methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:112–124. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.3>
- Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А. Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами. *Записки Горного института*. 2023;259:95–111. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>
Litvinenko V.S., Petrov E.I., Vasilevskaya D.V., Yakovenko A.V., Naumov I.A., Ratnikov M.A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023;259:95–111. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>
- Zhukovskiy Yu., Koshenkova A., Vorobeva V., Rasputin D., Pozdnyakov R. Assessment of the impact of technological development and scenario forecasting of the sustainable development of the fuel and energy complex. *Energies*. 2023;16(7):3185. <https://doi.org/10.3390/en16073185>
- Жуковский Ю.Л., Сусликов П.К. Оценка потенциального эффекта применения технологии управления спросом на горных предприятиях. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024;16(3):895–908. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908>
Zhukovsky Yu.L., Suslikov P.K. Assessment of the potential effect of applying demand management technology at mining enterprises. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(3):895–908. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-895-908>
- Koteleva N., Valnev V. Automatic detection of maintenance scenarios for equipment and control systems in industry. *Applied Sciences*. 2023;13(24):12997. <https://doi.org/10.3390/app132412997>
- Труфанова И.С., Невзоров Д.Н. Применение конвейерных поездов как внешнего транспорта обогатительных предприятий. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):64–78. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_64
Trufanova I.S., Nevzorov D.N. The use of conveyor trains as external transport for enrichment enterprises. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):64–78. (In Russ.)
- Soofastaei A., Aminossadati S.M., Kizil M.S., Knights P. A comprehensive investigation of loading variance influence on fuel consumption and gas emissions in mine haulage operation. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2016;26(6):995–1001. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.09.006>
- Мякотных А.А., Иванова П.В., Иванов С.Л. Критерии и технологические требования создания мостовой платформы добычи торфяного сырья для климатически нейтральной геотехнологии. *Горная промышленность*. 2024;(4):116–120. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-116-120>
Myakotnykh A.A., Ivanova P.V., Ivanov S.L. Criteria and technological requirements for creation of a bridge platform to extract peat raw materials for climate-neutral geotechnology. *Russian Mining Industry*. 2024;(4):116–120. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-4-116-120>

12. Pryalukhin A.F., Martyushev N.V., Malozyomov B.V., Klyuev R.V., Filina O.A., Konyukhov V.Yu., Makarov A.A. Improvement of operational reliability of units and elements of dump trucks taking into account the least reliable elements of the system. *World Electric Vehicle Journal*. 2024;15(8):365. <https://doi.org/10.3390/wevj15080365>
13. Курганов В.М., Грязнов М.В., Колобанов С.В. Оценка надежности функционирования экскаваторно-автомобильных комплексов в карьере. *Записки Горного института*. 2020;241:10–21. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.10>
Kurganov V.M., Gрязnov M.V., Kolobanov S.V. Assessment of operational reliability of quarry excavator-dump truck complexes. *Journal of Mining Institute*. 2020;241:10–21. <https://doi.org/10.31897/pmi.2020.1.10>
14. Андреева Л.И., Ушаков Ю.Ю. Исследование эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2016;(3):74–77. Режим доступа: <http://iuggu.ru/index.php/archive/xxi-vek/2016/3-2016/78-ru/479-14-3-16> (дата обращения: 18.01.2025).
Andreeva L.I., Ushakov Yu.Yu. Research of operational reliability of quarry dump trucks. *Izvestiya Uralskogo Gosudarstvennogo Gornogo Universiteta*. 2016;(3):74–77. (In Russ.) Available at: <http://iuggu.ru/index.php/archive/xxi-vek/2016/3-2016/78-ru/479-14-3-16> accessed: 18.01.2025).
15. Кузин А.А., Филиппов В.Г. Прогнозирование величин оползневых смещений на основе геодезических данных. *Устойчивое развитие горных территорий*. 2024;16(3):1176–1191. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1176-1191>
Kuzin A.A., Filippov V.G. Forecasting landslide displacement values based on geodetic data. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2024;16(3):1176–1191. (In Russ.) <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2024-16-3-1176-1191>
16. Кузин А.А., Филиппов В.Г. Метод определения плановых координат и высоты рабочего репера на оползне с принудительными отклонениями вехи от отвесного положения // *Геодезия и картография*. 2024;(9):2–11. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1011-9-2-11>
Kuzin A.A., Filippov V.G. Method for determining the plan view coordinates and height of the working benchmark on a landslide with forced inclinations of the pole from the plumb position. *Geodesy and Cartography*. 2024;(9):2–11. (In Russ.) <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2024-1011-9-2-11>
17. Мустафин М.Г., Валькова Е.О. Маркшейдерско-геомеханическое обоснование методики наблюдений за деформациями бортов карьеров. *Уголь*. 2024;(7):55–61. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-7-55-61>
Mustafin M.G., Valkova E.O. Surveying and geomechanical justification for the methods of quarry sides deformations observation. *Ugol'*. 2024;(7):55–61. (In Russ.) <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2024-7-55-61>
18. Safiullin R.N., Safiullin R.R., Sorokin K.V., Kuzmin K.A., Rudko V.A. Integral assessment of influence mechanism of heavy particle generator on hydrocarbon composition of vehicles motor fuel. *International Journal of Engineering*. 2024;37(8):1700–1706. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.08b.20>
19. Safiullin R.N., Reznichenko V.V., Gorlatov D.V. Modeling and optimization of processes of transportation of heavy cargoes based on the automation of monitoring systems for the motor vehicles movement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;378:012069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/378/1/012069>
20. Safiullin R., Epishkin A., Safiullin R., Haotian T. Method of forming an integrated automated control system for intelligent objects. In: *Ceur workshop proceedings: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference "Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems"* (ITIDMS-II-2021). Aachen, Germany; 2021, pp. 17–26.

Информация об авторах

Лавренко Сергей Александрович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой практических навыков и опыта, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1760-310X>; lavrenko_sa@pers.spmi.ru

Шорников Виталий Викторович – кандидат технических наук, заместитель заведующего кафедрой практических навыков и опыта, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0002-0198-4796>

Ботян Евгений Юрьевич – аспирант кафедры транспортно-технологических процессов и машин, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-3395-935X>

Пушкарев Александр Евгеньевич – доктор технических наук, профессор кафедры наземных транспортно-технологических машин, Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Шмидт Иван Владимирович – специалист по работе с клиентами, ООО «М4Е», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Информация о статье

Поступила в редакцию: 02.01.2025

Поступила после рецензирования: 12.02.2025

Принята к публикации: 13.02.2025

Information about the authors

Sergey A. Lavrenko – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Department of Practical Skills and Experience, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1760-310X>; e-mail: lavrenko_sa@pers.spmi.ru

Vitaliy V. Shornikov – Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Department of Practical Skills and Experience, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0002-0198-4796>

Evgeny Yu. Botyan – Postgraduate Student, Department of Transport and Technological Processes and Machines, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-3395-935X>

Aleksandr E. Pushkarev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Land Transport and Technological Machines, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

Ivan V. Shmidt – Customer Relations Specialist, M4E LLC, Saint Petersburg, Russian Federation

Article info

Received: 02.01.2025

Revised: 12.02.2025

Accepted: 13.02.2025