ISSN 1816-4528 (Print) **ISSN 2949-0634 (Online)**

Научная статья

УДК 622.684
DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-121-127

Попов Иван Петрович, Дубинкин Дмитрий Михайлович

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

* для корреспонденции: popovip@bmstu.ru

РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ СЕЧЕНИЙ ЛОНЖЕРОНОВ РАМ КАРЬЕРНЫХ САМОСВАЛОВ

Аннотация.
Для повышения надежности и эффективности большегрузных карьерных самосвалов, которые эксплуатируются в условиях высоких статических и динамических нагрузок, необходимо оценивать параметры элементов рам карьерных самосвалов на стадии проектирования. Целью исследования является разработка и обоснование рациональных сечений лонжеронов для рам карьерных самосвалов. Рама карьерного самосвала является высоконагруженной несущей конструкцией, воспринимающей изгиб и кручение, при этом рациональный выбор геометрических параметров лонжеронов определяет ресурс и металлоемкость конструкции. Установлено, что типовое сечение лонжерона представляет собой замкнутый коробчатый профиль, образованный горизонтальными полками и вертикальными стенками разной толщины, работающий преимущественно на поперечный изгиб. В работе предложен критериальный подход к оценке параметров сечений элементов рамы на основе условий равнопрочности и постоянной массы. Проведен параметрический анализ для количественной оценки параметров сечения лонжерона в зависимости от отношения толщин горизонтальных и вертикальных листов. Для коробчатого профиля лонжерона установлено оптимальное отношение толщины полки к стенке $k = tn / tc = 2$, обеспечивающее максимальный момент сопротивления изгибу при допустимом уровне касательных напряжений. Данное значение обеспечивает прирост момента сопротивления изгибу на 20% при сохранении массы или снижение металлоемкости на 19,6% при сохранении прочности, при этом рост касательных напряжений в стенке (54%) остается в допустимых пределах. Разработанный критерий позволяет обоснованно снижать металлоемкость рамы без потери несущей способности и может быть использован на этапе проектирования карьерных самосвалов.

Информация о статье
Поступила:
03 июля 2026 г.

Одобрена после рецензирования:
01 сентября 2026 г.

Принята к печати:
15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:
карьерный самосвал, рама, поперечина, лонжерон, параметры сечений, момент сопротивления кручению, момент сопротивления изгибу

Для цитирования: Попов И.П., Дубинкин Д.М. Разработка критерия для оценки параметров сечений лонжеронов рам карьерных самосвалов // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 4 (186). С. 121-127. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-121-127, EDN: WZKPVE

Благодарности
Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по соглашению от 30.09.2022 г. №075-15-2022-1198 с ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева» Комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» (КНТП «Чистый уголь – Зеленый Кузбасс») в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Введение

Современная горнодобывающая промышленность предъявляет повышенные требования к надежности и эффективности большегрузных карьерных самосвалов, которые эксплуатируются в условиях высоких статических и динамических нагрузок [1–3], агрессивной среды и сложного рельефа [4, 5]. Несущей системой таких машин является рама, ключевыми силовыми элементами которой выступают лонжероны и поперечины [6, 7]. Их геометрические параметры напрямую определяют прочность, жесткость на кручение и изгиб, а также усталостную долговечность конструкции в целом [8, 9]. Нерационально выбранные сечения основных конструктивных элементов рамы приводят к локальным концентрациям напряжений [10], преждевременному появлению усталостных трещин [11] и избыточной металлоемкости, что снижает грузоподъемность горной машины, поэтому определение рациональных геометрических параметров элементов рам карьерных самосвалов на ранних стадиях проектирования является актуальной целью.

Целью исследования является разработка и обоснование рациональных геометрических параметров лонжеронов для рам карьерных самосвалов. Решение этой задачи позволит повысить эксплуатационный ресурс рамы, снизить металлоемкость автосамосвала и повысить энергоэффективность транспортировки горной массы.

Основная часть

Рама карьерного самосвала (Рис. 1) работает в сложных условиях, воспринимая два основных типа нагрузок: изгиб и кручение [12–15]. При работе рамы на изгиб основную роль играют лонжероны; поперечины работают на сжатие и растяжение, связывая лонжероны и распределяя нагрузку между ними. При работе рамы на кручение (например, при повороте) лонжероны и поперечины работают на кручение собственного сечения и на стесненное кручение (изгиб с кручением).

Стоит отметить, что при кручении стержней сложного профиля поперечные сечения стержней искривляются и становятся неплоскими – происходит депланация сечений. При свободном кручении депланация для всех сечений стержня и касательные напряжения одинаковы. Депланация крайних сечений при закреплении поперечины к лонжерону ограничена и равна 0. При таком стесненном кручении в стержне возникают значительные нормальные напряжения, определяющие его прочность [16]. Производная от угла закручивания по длине при стесненном кручении не меняется, а депланация отдельных точек сечения пропорциональна производной по длине стержня угла закручивания с обратным знаком. Мера депланации χ определяется по формуле:

$$\chi = -d\theta/dz,$$

где θ – угол закручивания стержня, град; z – расчетная длина, м.

Закономерность изменения угла закручивания по длине стержня определяется дифференциальным уравнением стесненного кручения тонкостенного стержня [16]. Уравнение для угла закручивания при стесненном кручении отличается от уравнения при свободном кручении наличием дополнительного множителя, зависящего от изгибно-крутильной характеристики стержня. При одинаковом крутящем моменте (Мкр) полный угол закручивания стержня при стесненном кручении меньше, чем при свободном кручении, т. е. жесткость его больше. При расчетах это учитывается введением приведенного момента инерции стержня при кручении. Нормальные напряжения, возникающие при стесненном кручении, выражаются через бимомент – особый вид внутреннего усилия. При введении понятия бимомента основные формулы изгиба и стес-

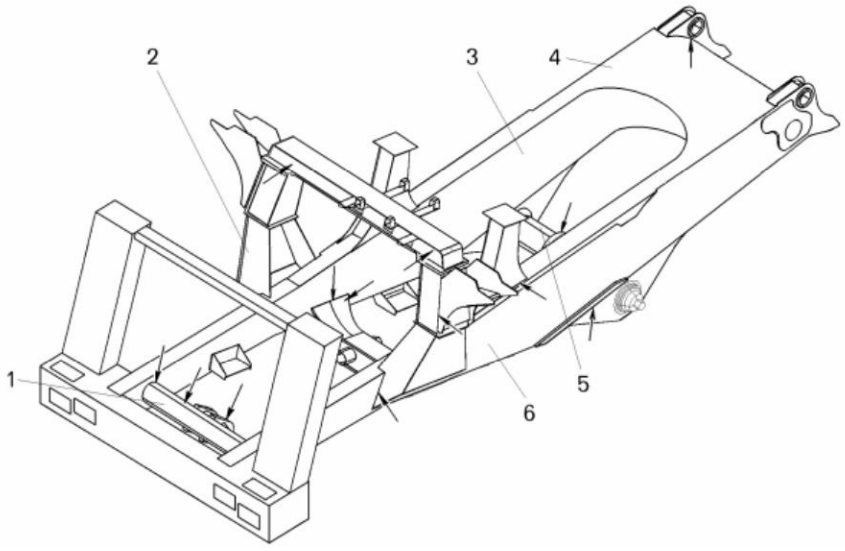

Рис. 1. Рама карьерного самосвала БЕЛАЗ-7513 (1 – первая поперечина; 2 – вторая поперечина; 3, 6 – лонжероны; 4 – задняя поперечина; 5 – третья поперечина)

Fig. 1. Frame of the BELAZ-7513 mining dump truck (1 – first crossmember; 2 – second crossmember; 3, 6 – longitudinal beams; 4 – rear crossmember; 5 – third crossmember)

ненного кручения стержня аналогичны.

Учитывая тот факт, что рама большегрузного карьерного самосвала является сложной пространственной конструкцией, следует рассмотреть влияние геометрических размеров лонжеронов коробчатого сечения переменной высоты на крутильную жесткость.

Типовое сечение лонжерона представляет собой замкнутый коробчатый профиль, образованный горизонтальными полками и вертикальными стенками разной толщины, работающий преимущественно на поперечный изгиб [13, 14]. Специфика данного вида деформации заключается в совместном действии изгибающего момента, воспринимаемого полками коробчатого сечения, и поперечной силы, воспринимаемой стенками. Наличие поперечной силы накладывает ограничение на утонение вертикальных листов.

Оптимальное отношение толщины полки к толщине стенки при работе конструкции лонжерона на поперечный изгиб обозначается как:

$$k = t_п / t_c,$$

где $t_п$ – толщина горизонтального листа; t_c – толщина вертикального листа.

При изгибе в сечении возникают нормальные σ и касательные τ напряжения. Условие равнопрочности требует одновременного исчерпания несущей способности по обоим критериям. Момент сопротивления изгибу для тонкостенного коробчатого сечения выражается как:

$$Wx = B\cdot t_п\cdot H+(t_c\cdot H^2)/3 = t_c\cdot H\cdot (B\cdot k+H/3),$$

где B – ширина сечения; H – высота сечения.

Так как формула для расчета момента сопротивления получена на основе теории тонкостенных стержней, при ее выводе приняты допущения о пренебрежении собственными моментами инерции горизонтальных листов и пренебрежении собственными моментами инерции стенок ($t \ll H$) [16]. Погрешность данного допущения по сравнению с точным расчетом по разности прямоугольников не превышает 2…3%, что допустимо для параметрического анализа и поиска оптимального отношения толщин.

Площадь сечения A вычисляется по формуле:

$$A = 2\cdot (B\cdot t_п+H\cdot t_c) = 2\cdot t_c\cdot (B\cdot k+H).$$

Как видно из формул, увеличение параметра k приводит к перераспределению металла от стенок к полкам, что увеличивает работу сечения на изгиб, но ослабляет работу стенки на сдвиг, так как максимальные касательные напряжения τ пропорциональны $1/t_c$.

Для количественной оценки проведен параметрический анализ (Рис. 2). Рассмотрены два расчетных случая:

1. Постоянная масса (A=const): оценка прироста момента сопротивления Wx;

2. Равнопрочность (Wx=const): оценка снижения массы.

Анализ зависимости параметров сечения лонжерона от отношения толщин горизонтальных и вертикальных листов (Рис. 2) показывает, что при переходе от равнотолщинного сечения (k = 1) к

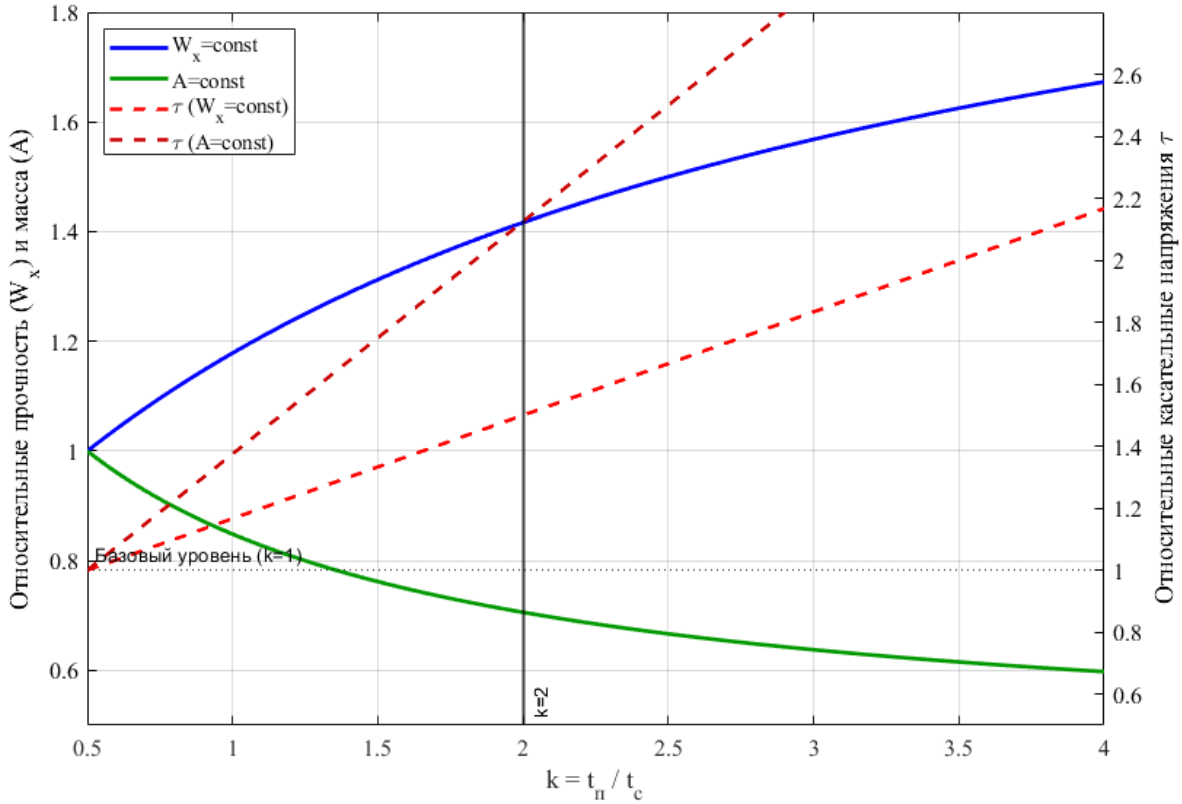

Рис. 2. Зависимость параметров сечения лонжерона от отношения толщин горизонтальных и вертикальных листов

Fig. 2. Dependence of the cross-section parameters on the ratio of the thicknesses of the horizontal and vertical thick plates

отношению k = 2: с учетом сохранения массы момент сопротивления Wx возрастает на 20%, что эквивалентно пропорциональному повышению несущей способности по изгибающему моменту. В случае рассмотрения равнопрочности перераспределение металла позволяет снизить площадь сечения A и массу погонного метра конструкции на 19,6%, однако увеличение отношения толщин листов сопровождается ростом касательных напряжений в стенке. При k = 2 толщина стенки tc уменьшается, что приводит к увеличению τ на 54% по сравнению с базовым вариантом k = 1. Данное значение все еще остается в допустимых пределах для высокопрочных сталей, но при переходе к k = 3 дополнительное снижение массы составляет около 10%, в то время как касательные напряжения возрастают уже более чем в 2 раза от базового уровня. Рост τ означает, что стенка становится тонкой и теряет устойчивость от сдвига (выпучивание) задолго до достижения текучести материала горизонтальных листов.

Таким образом, отношение толщин k = tп/tc = 2 является точкой оптимума (Рис. 2): такое значение отношения толщин обеспечивает равнопрочность сечения по нормальным и касательным напряжениям и исключает преждевременную потерю местной устойчивости стенок. Найденное значение отношения толщин обеспечивает максимальную эффективность сечения при работе на изгиб. Однако для замкнутого коробчатого профиля, работающего на кручение, наиболее рациональным является равнотолщинное сечение, обеспечивающее равномерное распределение потока касательных напряжений по контуру. Назначение k = 2 приводит к двукратному превышению касательных напряжений в вертикальном листе по сравнению с горизонтальным. Указанное противоречие разрешается признанием доминирующего влияния изгибающих моментов в несущей системе карьерного самосвала, а также использованием системы внутренних поперечных диафрагм, которые компенсируют снижение местной устойчивости тонкой стенки при кручении и поперечном сдвиге.

Выводы

В результате проведенного исследования разработан критерий для оценки геометрических параметров силовых элементов рам карьерных самосвалов, работающих в условиях сложного напряженно-деформированного состояния. Установлено, что для лонжеронов коробчатого сечения рам карьерных самосвалов, воспринимающих преимущественно изгибающие нагрузки, оптимальным является отношение толщин горизонтальных и вертикальных листов k = tп / tc = 2. Данное значение обеспечивает прирост момента сопротивления изгибу на 20% при сохранении массы или снижение металлоемкости на 19,6% при сохранении прочности, при этом рост касательных напряжений в стенке (54%) остается в допустимых пределах.

Разработанный критерий для оценки параметров сечений лонжеронов рам карьерных самосвалов может использоваться на ранних стадиях проектирования с целью анализа и выбора конструктивных решений рам автосамосвалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Испеньков С. А., Ракицкий А. А. Моделирование динамической нагруженности рам карьерных самосвалов // Вестник Оренбургского государственного университета. 2011. № 10(129). С. 174–180.
2. Доронин С. В., Донцова Т. В. Проектные оценки долговечности и живучести рам карьерных самосвалов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2012. Т. 5. № 7. С. 760–765. EDN PUMSSV.
3. Шляжко С. А., Лисовский Э. В., Шукюров А. О. [и др.] Сравнительная оценка усталостной долговечности вариантов конструкции рамы карьерного самосвала методами компьютерного моделирования // Актуальные вопросы машиноведения. 2021. Т. 10. С. 207–216.
4. Ильин В. Я., Федоров Б. А., Клюшин Ю. Ф. СНиП 2.05.07-91*. Промышленный транспорт: Строительные нормы и правила. Минстрой России. Москва : ГП ЦПП, 1996. 112 с.
5. Арефьев С. А. Оценка и обоснование рациональных дорожных условий эксплуатации карьерных автосамосвалов большой грузоподъемности : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность: 25.00.22 «Геотехнология» (подземная, открытая и строительная)». Екатеринбург, 2015.
6. Мариев П. Л. [и др.]. Карьерные самосвалы особо большой грузоподъемности. Проектирование, технологии, маркетинг. Минск : Интегралполиграф, 2008. 320 с.
7. Вихров А. В. Несущие системы транспортных средств специального назначения. Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2015. 112 с.
8. Estanislau Dantas, A., Correa de Faria, M.T. Off-highway truck setup influence on vehicle dynamics and frame durability // Multibody System Dynamics. 2024.
9. Mi C., Liu J., Xiao X., Liu J., Ming R., Li W., Yao Q. Interval Multi-Objectives Optimization of Electric Wheel Dump Truck Frame Based on Blind Number Theory // Applied Sciences. 2019. Vol. 9. № 20. Art. 4214.
10. Бокарев А. И., Дианов В. А., Карташов А. Б. [и др.] Статистика отказов высоконагруженных узлов карьерных самосвалов грузоподъемностью 220 тонн // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2024. № 4(164). С. 23–31.
11. Паначев И. А., Кузнецов И. В. О трещинообразовании в металлоконструкциях большегрузных автосамосвалов при эксплуатации на разрезах Кузбасса // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 3(36). С. 14–21.
12. Попов И. П., Бокарев А. И., Дианов В. А., Зайцев Л. А. Анализ тенденции развития конструк-

ций несущих систем карьерных самосвалов // ИИТМА-2024: Сборник материалов VIII Международной научно-практической конференции, том 2, Кемерово, 21–23 ноября 2024 года. Кемерово : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева», 2024. С. 36–50.

13. Хорешок А. А., Дубинкин Д. М., Зеляева Е. А. Обзор конструкций несущих систем (рам) карьерных автосамосвалов грузоподъемностью до 110 т // Техника и технология горного дела. 2022. № 1(16). С. 4–15.

14. Дубинкин Д. М., Зеляева Е. А., Аксенов В. В. Технические решения несущих систем (рам) карьерных самосвалов как объект интеллектуальной собственности // Уголь. 2024. № 5(1180). С. 47–53. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-5-47-53.

15. Карьерные самосвалы серии БЕЛАЗ-7513: руководство по эксплуатации. Жодино, 2016. 234 с.

16. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов: учебник для вузов. 17-е изд., испр. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 542 с.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:
Попов Иван Петрович, аспирант, младший научный сотрудник научного центра «Цифровые технологии», г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, e-mail: popovip@bmstu.ru
Дубинкин Дмитрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент, г. Кемерово, Российская Федерация, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева; ORCID 0000-0002-8193-9794, Scopus ID 57197717432, e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Заявленный вклад авторов:
Попов Иван Петрович – сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, написание текста. выводы.
Дубинкин Дмитрий Михайлович – постановка исследовательской задачи, концептуализация исследования, анализ данных, написание текста, выводы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-121-127

Ivan P. Popov, Dmitry M. Dubinkin

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

***** for correspondence: popovip@bmstu.ru

DEVELOPMENT OF A CRITERIA FOR ASSESSING THE PARAMETERS OF CROSS-SECTIONS OF FRAME LONGITUDINAL BEAMS OF MINING DUMP TRUCKS

Article info
Received:
03 July 2026

Accepted for publication:
01 September 2026

Accepted:
15 September 2026

Abstract.
To improve the reliability and efficiency of heavy-duty dump trucks that are operated under high static and dynamic loads, it is necessary to evaluate the parameters of the frame elements of dump trucks at the design stage. The purpose of the study is to develop and substantiate rational cross-sections of spars for the frames of mining dump trucks. The frame of a mining dump truck is a highly loaded load-bearing system that absorbs bending and torsion, while the rational choice of the geometric parameters of the longitudinal beams and cross members determines the service life and metal consumption of the structure. It is established that the typical section of the spar is a closed box-shaped profile formed by horizontal shelves and vertical walls of different thicknesses, working mainly on transverse bending. The paper proposes a criterion-based approach to estimating the cross-section parameters of frame elements based on the conditions of

Keywords: *mining dump truck, frame, crossmember, longitudinal beam, section parameters, torsional modulus, bending modulus*

equal strength and constant mass. A parametric analysis was performed to quantify the parameters of the section of the spar from the ratio of the thickness of horizontal and vertical sheets. For the box spar profile, the optimal ratio of flange to wall thickness k = tn/tc = 2 has been established, providing the maximum moment of resistance to bending at an acceptable level of tangential stresses. This value provides an increase in the moment of bending resistance by 20% while maintaining mass or a decrease in metal consumption by 19.6% while maintaining strength, while the increase in tangential stresses in the wall (54%) remains within acceptable limits. The developed criteria make it possible to reasonably reduce the metal consumption of the frame without loss of load-bearing capacity and can be used at the design stage of mining dump trucks.

For citation: Popov I.P., Dubinkin D.M. Development of a criteria for assessing the parameters of cross-sections of frame longitudinal beams of mining dump truck. Mining Equipment and Electromechanics, 2026; 4(186):121-127 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-121-127, EDN: WZKPVE

Acknowledgments

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation under Agreement № 075-15-2022-1198 dated 30.09.2022 with the T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University on complex scientific and technical program of full innovation cycle «Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life» (the «Clean Coal – Green Kuzbass» Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle) as part of implementing the project «Development and creation of an unmanned shuttle-type mining dump truck with a payload of 220 tons» in terms of research, development and experimental-design work.

REFERENCES

1. Ispenkov S.A., Rakitskiy A.A. Modeling of dynamic loading of mining dump truck frames. *Bulletin of the Orenburg State University.* 2011; 10(129):174-180.

2. Doronin, S.V., Dontsova T.V. Design assessments of the durability and survivability of mining dump truck frames. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and Technology.* 2012; 5(7):760-765.

3. Shlyazhko S.A., Lisovsky E.V., Shukyurov A.O. [et al.] Comparative assessment of the fatigue life of variants of the frame design of a mining dump truck using computer modeling methods. *Current issues in mechanical engineering.* 2021; 10:207-216.

4. Ilyin V.Ya., Fedorov B.A., Klyushin Yu.F. SNiP 2.05.07-91*. Industrial transport: Building codes and regulations. Ministry of Construction of the Russian Federation. Moscow: GP TsPP; 1996. 112 p.

5. Arefyev S.A. Evaluation and justification of rational road conditions for the operation of heavy-duty quarry dump trucks : dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Specialty: 25.00.22 – "Geotechnology" (underground, open and construction)". Ekaterinburg, 2015.

6. Mariev P.L. [et al.]. Extra-heavy-duty quarry dump trucks. Design, technology, marketing. Minsk: Integralpoligraf; 2008. 320 p.

7. Vikhrov A.V. Load-bearing systems of special-purpose vehicles. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); 2015. 112 p.

8. Estanislau Dantas, A., Correa de Faria, M.T. Off-highway truck setup influence on vehicle dynamics and frame durability. *Multibody System Dynamics.* 2024.

9. Mi C., Liu J., Xiao X., Liu J., Ming R., Li W., Yao Q. Interval Multi-Objectives Optimization of Electric Wheel Dump Truck Frame Based on Blind Number Theory. *Applied Sciences.* 2019; 9(20). Art. 4214.

10. Bokarev A.I., Dianov V.A., Kartashov A.B. [et al.] Statistics of failures of highly loaded units of quarry dump trucks with a carrying capacity of 220 tons. *Bulletin of Kuzbass State Technical University.* 2024; 4(164):23-31.

11. Panachev I.A., Kuznetsov I.V. On crack formation in metal structures of heavy-duty dump trucks during operation in Kuzbass open pit mines. *Bulletin of the Engineering School of Far Eastern Federal University.* 2018; 3(36):14-21.

12. Popov I.P., Bokarev A.I., Dianov V.A., Zaitsev L.A. Analysis of the development trend of load-bearing system designs of quarry dump trucks. *IITMA-2024: Collection of materials of the VIII International scientific and practical conference.* Volume 2, Kemerovo, November 21-23, 2024. Kemerovo: T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; 2024. Pp. 36-50.

13. Khoreshok A.A., Dubinkin D.M., Zelyaeva E.A. Review of the designs of supporting systems (frames) of quarry dump trucks with a carrying capacity of up to 110 tons. *Mining equipment and technology.* 2022; 1(16):4-15.

14. Dubinkin D.M., Zelyaeva E.A., Aksenov V.V. Technical solutions of bearing systems (frames) of mining dump trucks as an object of intellectual property. *Coal.* 2024; 5(1180):47-53. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-5-47-53.

15. BELAZ-7513 series quarry dump trucks: operating manual. Zhodino, 2016. 234 p.

16. Feodosyev V.I. Strength of materials: textbook for universities. 17th ed., corrected. Moscow: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University; 2018. 542 p.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:
Ivan P. Popov, postgraduate student, junior researcher at the scientific center "Digital Technologies", Kemerovo, Russian Federation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, e-mail: popovip@bmstu.ru
Dmitry M. Dubinkin, PhD (Engineering), Associate Professor, Kemerovo, Russian Federation, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; ORCID 0000-0002-8193-9794, Scopus ID 57197717432, e-mail: ddm.tm@kuzstu.ru

Contribution of the authors:
Ivan P. Popov – data collection and analysis, review of relevant literature, writing a text, conclusions.
Dmitry M. Dubinkin – setting the research task, conceptualizing the research, data analysis, writing a text, conclusions.

Authors have read and approved the final manuscript.