

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КАРТЕРА ЗАДНЕГО МОСТА КАРЬЕРНОГО САМОСВАЛА БЕЛАЗ-7530 ПРИ ПРЯМОЛИНЕЙНОМ ДВИЖЕНИИ С УЧЕТОМ БОКОВОГО НАКЛОНА

Дубинкин Д.М., Закрасовский Д.И.

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, Кемерово

Ключевые слова: картер, задний мост, Nastran, метод конечных элементов, БелАЗ-7530, расчет нагрузок.

Аннотация. Одним из ответственных элементов карьерного самосвала является картер заднего моста, который воспринимает основные нагрузки от задних колес, следовательно, среди металлоконструкций представляет наибольшую опасность при потере ресурса в ходе эксплуатации. С целью определения концентрации наибольших напряжений, в данной статье приведен анализ напряженно-деформированного состояния конструкции картера заднего моста БелАЗ-7530 методом конечных элементов в модуле Nastran. Описано служебное назначение картера заднего моста. Принят расчетный случай, а именно прямолинейное движение с боковым углом наклона. Определены и рассчитаны действующие силы на задний мост. В модуле Nastran подготовлена конечно-элементная модель картера заднего моста БелАЗ-7530, на основе нее разработана расчетная схема с действующими нагрузками и ограничениями. Согласно расчетам, наибольшие напряжения в конструкции картера заднего моста составляют 342 МПа, которые возникают в местах сварки опоры реактивной штанги. В других местах напряжения в среднем достигают 140 МПа.

RESEARCH OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE REAR AXLE CASE OF THE BELAZ-7530 QUARRY DUMP TRUCK DURING STRAIGHT-LINE MOVEMENT TAKING INTO ACCOUNT THE LATERAL INCLINATION

Dubinkin D.M., Zakrasovsky D.I.

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo

Keywords: case, rear axle, Nastran, finite element method, BelAZ-7530, load calculation.

Abstract. One of the critical elements of a mining dump truck is the rear axle housing, which takes the main loads from the rear axle wheels, therefore, among metal structures, it represents a great danger of resource loss during operation. It is noted that the ability to determine the concentration of the greatest stresses in the structure allows avoiding unscheduled equipment downtime. In order to determine the concentration of the greatest stresses, this article provides an analysis of the stress-strain state of the BelAZ-7530 rear axle housing structure using the finite element method in the Nastran module. The service purpose of the rear axle housing is described. A design case for rectilinear movement with a lateral angle of inclination is adopted, the acting forces on the rear axle are determined and calculated. A finite element model of the BelAZ-7530 rear axle housing is prepared in the Nastran module, based on which a calculation scheme with acting loads and limitations is developed. According to calculations, the greatest stresses in the rear axle housing structure are 342 MPa, which occur in the welding areas of the reaction rod support. In other places, the stresses reach an average of 140 MPa. At the same time, the deformations of the structure under the influence of loads are insignificant.

Введение

В процессе эксплуатации карьерных самосвалов (КС) горно-технологические условия оказывают влияние на возникновение напряжений в металлоконструкциях машины [1-3].

Одним из ответственных элементов КС является картер заднего моста (КЗМ), который воспринимает основные нагрузки от задних колес, следовательно, среди металлоконструкций представляет наибольшую опасность при потере ресурса в ходе эксплуатации [4, 5].

Дефекты КЗМ, которые не выявляются вовремя, приводят к внеплановым простоям КС. Избежать данные простои можно при своевременном контроле мест концентраций наибольших напряжений. Определить концентрации наибольший напряжений в конструкции КЗМ возможно с помощью напряженно-деформированного состояния (НДС) [6].

Максимальные нагрузки на колеса КС возникают при прохождении участка трассы на подъем с поворотом машины, значит и для конструкции заднего моста (в том числе и КЗМ)

это является наиболее нагруженным режимом. Данный случай рассчитать сложно из-за возникающего перераспределения нагрузок, дополнительно расчет усложняется необходимостью учитывать радиус поворота и скорость движения КС.

Помимо нагрузок, которые возникают при изменении режима движения по ровной дороге, существуют и нагрузки, которые возникают при движении с боковым наклоном машины. Боковой наклон (рис. 1) является наиболее существенным источником динамических нагрузок на колеса машины, которые воспринимает конструкция заднего моста [7].

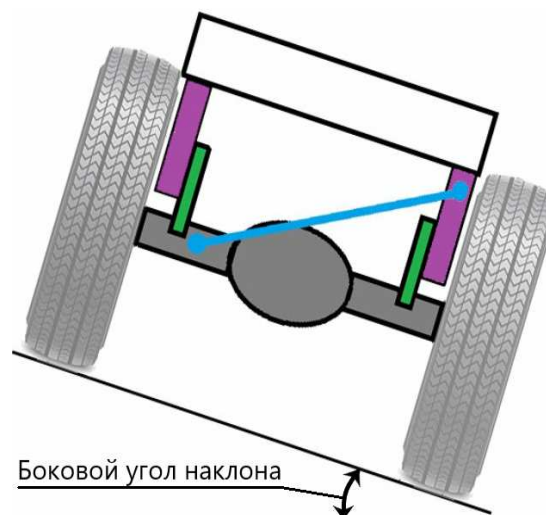


Рис. 1. Боковой наклон автомобиля

Цели и задачи исследования

Целью работы является определение НДС картера заднего моста карьерного самосвала БелАЗ-7530 при прямолинейном движении с учетом бокового наклона.

Для достижения заданной цели должны быть решены следующие задачи:

- провести анализ служебного назначения КЗМ;
- провести расчет действующих нагрузок на задний мост;
- провести расчет методом конечных элементов (МКЭ).

Анализ служебного назначения КЗМ

КЗМ является силовым элементом заднего моста (рис. 2) и предназначен для передачи на поперечину рамы через компоненты задней подвески различных усилий, действующих на задние колеса, которые устанавливаются на редукторы мотор-колес.

Пневмогидравлические рессоры задней подвески воспринимают только вертикальные нагрузки, поперечная штанга подвески – поперечные, а центральный шарнир – вертикальные, поперечные и продольные (рис. 3).

Анализ технической литературы показал, что КЗМ изготавливается из стали 10ХСНД (предел текучести $\sigma_{0,2} = 390$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 530$ МПа).

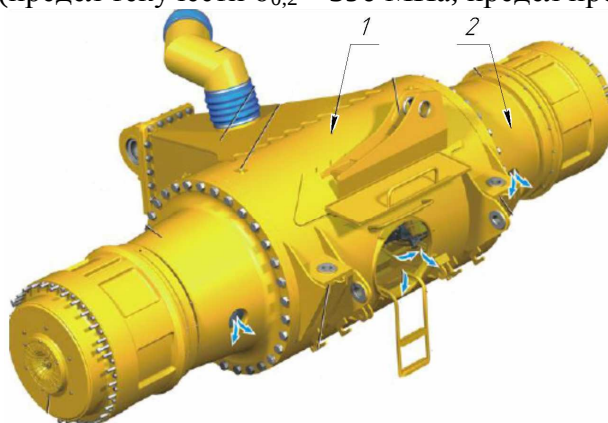


Рис. 2. Конструкция заднего моста БЕЛАЗ-7530:

- 1) картер заднего моста;
- 2) редуктор мотор-колеса

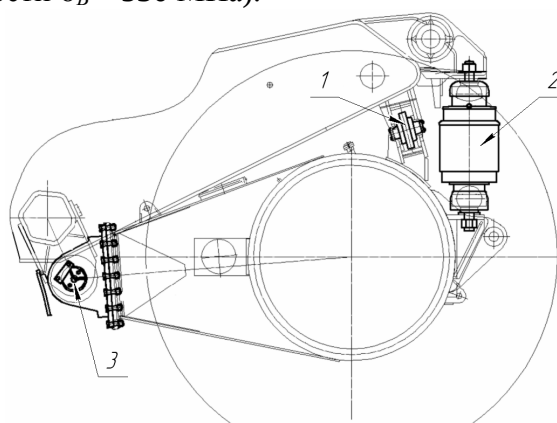


Рис. 3. Компоненты задней подвески, через которые передаются нагрузки на раму от КЗМ:

- 1) поперечная штанга подвески,
- 2) пневмогидравлическая рессора задней подвески, 3) центральный шарнир

Расчет действующих нагрузок на задний мост

Воздействие на колесо определяется шестью силовыми факторами, из которых три – силы, направленные вдоль осей XYZ, остальные три – моменты относительно осей XYZ:

- продольная (окружная) сила F_x ;
- боковая (осевая) сила F_y ;
- нормальная (радиальная) сила F_z ;
- опрокидывающий момент M_x ;
- крутящий момент M_y ;
- поворачивающий момент M_z .

В расчетном случае для прямолинейного движения с учетом бокового наклона в 10 градусов (данный угол является максимально допустимым) [8, 9] колесо испытывает следующие нагрузки: F_x , F_z и M_y [10, 11].

Исходные данные для проведения прочностного расчета КЗМ БЕЛАЗ-7530 представлены ниже (табл. 1).

Табл. 1. Исходные данные карьерного самосвала БЕЛАЗ-7530

Данные	Значение
Полная масса с грузом m , кг	376100
Допускаемый боковой угол наклона α , град	10
Передаточное отношение редуктора колеса u	28,38
Крутящий момент тягового электродвигателя ЭДП-800 M_y , Н·м	12700
Наружный диаметр шин D , мм	3154

Сила $F_{гор}$, действующая на задние колеса при движении по горизонтальному участку составляет 67% от общей массы груженого самосвала и делится поровну на каждое колесо:

$$F_{гор} = \frac{0,67 \cdot m \cdot 9,8}{2} = 1234736 \text{ Н.}$$

Коэффициенты перераспределения нагрузок k на колеса при наклоне в 10 градусов, согласно исследованиям и пренебрегая параметрами подвески, составляет приблизительно 1,26 [5].

Смещенная нормальная сила F_z при поперечном наклоне:

$$F_z = F_{гор} \cdot \cos \alpha = 1234736 \cdot 0,98 = 1215978 \text{ Н.}$$

Силы, действующие на правое и левое колесо при поперечном наклоне:

$$F_z^{пр} = \frac{F_z}{k} = \frac{1215978}{1,26} = 965062 \text{ Н;}$$

$$F_z^{лев} = F_z \cdot k = 1215978 \cdot 1,26 = 1532132 \text{ Н.}$$

Продольная сила, требуемая для разгона автосамосвала:

$$F_x = \frac{M_y \cdot 2 \cdot u}{D} = \frac{12700 \cdot 2 \cdot 28,38}{3,154} = 177064 \text{ Н.}$$

Проведение расчета МКЭ

Для исследования напряженно-деформированного состояния КЗМ была разработана электронная твердотельная модель заднего моста. На основе которой разработана конечно-элементная модель с использованием программного обеспечения NX CAE (Nastran). Далее подготовлена расчетная схема, где уже на конечно-элементной модели назначены реакции нагрузок от колес и закрепления с ограничениями (рис. 4).

Результаты расчета МКЭ заднего моста БелАЗ-7530 с суммарными напряжениями и деформациями представлены на изображениях ниже (рис. 5 и 6).

Согласно расчетам, максимальные напряжения для КЗМ составляют 342 МПа в местах сварки конструкции опоры реактивной штанги. В других местах напряжения в среднем достигают 140 МПа. Коэффициент запаса прочности по пределу текучести составил 1,1 – конструкция выдерживает нагрузки, которые вызывают упругие деформации. Однако данный коэффициент мал и при расчете наиболее нагруженного режима уже могут возникнуть нагрузки, которые вызовут пластические деформации, что недопустимо.

Наибольшие значения суммарных деформаций достигаются в зонах установки правого колеса (до 4,3 мм). При этом КЗМ практически не деформируется под воздействием нагрузок.

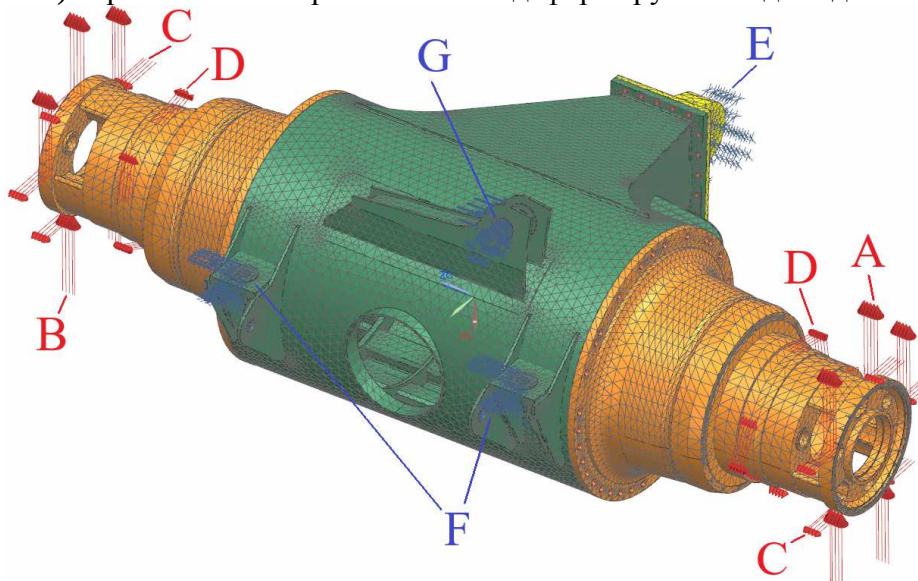


Рис. 4. Расчетная схема заднего моста: А – реакция силы $F_z^{лев}$; В – реакция силы $F_z^{пр}$; С – реакции сил F_x ; D – момент сопротивления крутящему моменту M_y ; E, F, G – закрепления с ограничениями

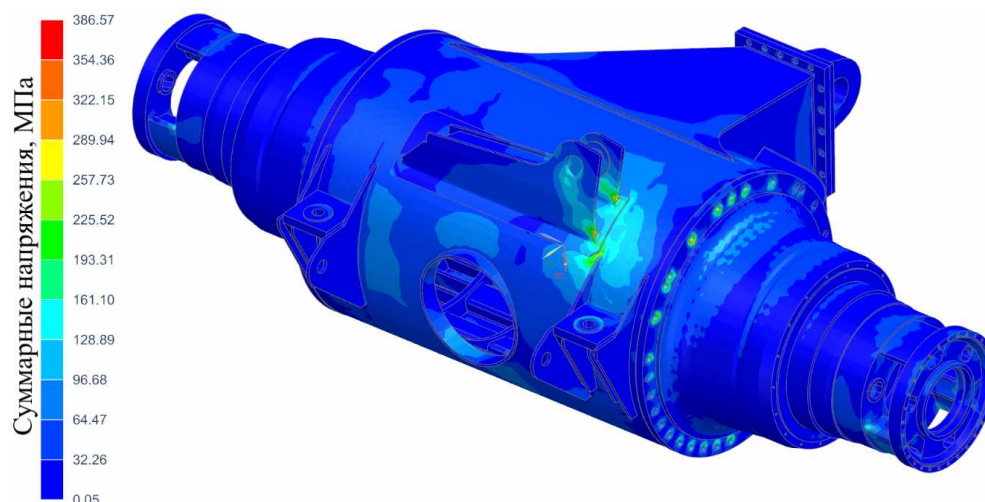


Рис. 5. Распределение суммарных напряжений по Мизесу

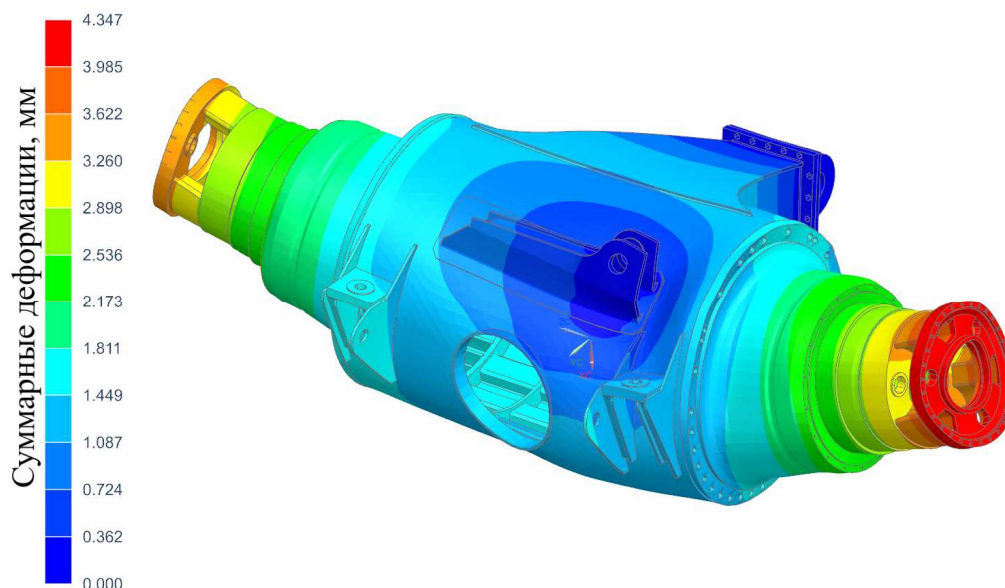


Рис. 6. Распределение суммарных деформаций

Вывод

С помощью описанного метода определены нагрузки, действующие на конструкцию КЗМ БелАЗ-7530 грузоподъемностью 220 тонн.

Наибольшие напряжения составляют 342 МПа, которые возникают в местах сварки опоры реактивной штанги. В других местах напряжения в среднем достигают 140 МПа. Коэффициент запаса прочности по пределу текучести для стали 10ХСНД составил 1,1. Таким образом, конструкция выдерживает нагрузки, которые вызывают упругие деформации (КЗМ практически не деформируется под воздействием нагрузок).

Целью дальнейших исследований является:

- валидация и верификация разработанной конечно-элементной модели и расчетной схемы;
- определение нагрузок при других расчетных случаях движения машины в зависимости от конструктивных решений КЗМ;
- обоснование параметров КЗМ электромеханического карьерного самосвала.

Финансирование. 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») утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 г. № 1144-р в рамках реализации мероприятия «Разработка и создание беспилотного карьерного самосвала челночного типа грузоподъемностью 220 тонн» в части выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Список литературы

1. Зырянов И.В., Маев С.П. Опыт эксплуатации карьерных самосвалов на Нюрбинском ГОКе // Горный журнал. – 2006. – №2. – С. 69-72.
2. Яковлев В.Л., Тарасов П.И., Журавлев А.Г., Мариев П.Л. Требования к совершенствованию конструкций карьерных автосамосвалов // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. – №3-4. – С. 86-92.
3. Насковец А.М., Пархомчик П.А., Егоров А.Н., Шишко С.А., Моисеенко В.И. Современное развитие карьерного транспорта производства ОАО «БЕЛАЗ» // Актуальные вопросы машиноведения. – 2018. – №7. – С. 8-11.
4. Фарафонов М.О., Кузнецов И.В. К исследованию трещинообразования заднего моста подвески самосвала БЕЛАЗ-75131 // Россия молодая: Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2019. – С. 60211.
5. Кузнецов И.В. Оценка ресурса металлоконструкций задних мостов автосамосвалов при эксплуатации на разрезах Кузбасса: дисс. ... канд. техн. наук. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2015. – 138 с.
6. Костюкович А.Н. Современные расчетные технологии – в помощь конструкторам современных БЕЛАЗов // Горная промышленность. – 2016. – № 3. – С. 26.
7. Автотракторные колеса: Справочник / Под общ. ред. И.В. Балабина. – М.: Машиностроение, 1985. – 272 с.
8. Дубинкин Д.М., Бокарев А.И. Разработка методики определения нагрузок на силовую структуру карьерных самосвалов // Горное оборудование и электромеханика. – 2023. – №5. – С. 31-44. – doi.org/10.26730/1816-4528-2023-5-31-44.
9. Рахаев С.М., Газизуллин Р.Л., Карташов А.Б., Дубинкин Д.М., Зеляева Е.А. Выбор нагрузочных режимов на начальных этапах проектирования несущих систем (рам) карьерных самосвалов // Техника и технология горного дела. – 2023. – № 4. – С. 41-55. – doi.org/10.26730/2618-7434-2023-4-41-55.
10. Любимов О.В., Закрасовский Д.И., Сафина Д.А., Овсянников М.О. Определение нагрузок на элементы крепления колес передней оси карьерного самосвала грузоподъемностью 220 тонн // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2024. – №4. – С. 42-49. – doi.org/10.26730/1999-4125-2024-4-42-49.

11. Остретсов А.В., Красавин П.А., Воронин В.В. Шины и колеса для автомобилей и тракторов: Учебное пособие. – М.: МГТУ «ММИ», 2011. – 85 с.

References

1. Zyryanov I.V., Maev S.P. Operating experience of quarry dump trucks at the Nyurba Mining and Processing Plant // Mining journal. 2006, no. 2, pp. 69-72.
2. Yakovlev V.L., Tarasov P.I., Zhuravlev A.G., Mariev P.L. Requirements for improving the designs of quarry dump trucks // Mechanics of machines, mechanisms and materials. 2012, no. 3-4, pp. 86-92.
3. Naskovets A.M., Parkhomchik P.A., Egorov A.N., Shishko S.A., Moiseenko V.I. Modern development of quarry transport produced by OJSC BELAZ // Actual issues of mechanical engineering. 2018, no. 7, pp. 8-11.
4. Farafontov M.O., Kuznetsov I.V. To the study of crack formation in the rear axle of the BELAZ-75131 dump truck suspension // Young Russia: Collection of materials of the XI All-Russian scientific and practical conference with international participation. – Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2019. – P. 60211.
5. Kuznetsov, I.V. Evaluation of the resource of metal structures of the rear axles of dump trucks during operation in Kuzbass open pits: diss. ... cand. of tech. sc. – Kemerovo: Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, 2015. – 138 p.
6. Kostyukovich, A.N. Modern calculation technologies – to help designers of modern BELAZ trucks // Mining industry. 2016, no. 3, p. 26.
7. Automotive and tractor wheels: Handbook / Under the general editorship I.V. Balabin. – M.: Mechanical engineering, 1985. – 272 p.
8. Dubinkin D.M., Bokarev A.I. Development of a methodology for determining loads on the power structure of quarry dump trucks // Mining equipment and electromechanics. 2023, no. 5, pp. 31-44. doi.org/10.26730/1816-4528-2023-5-31-44.
9. Rakhaev S.M., Gazizullin R.L., Kartashov A.B., Dubinkin D.M., Zelyaeva E.A. Selection of load modes at the initial stages of designing load-bearing systems (frames) of quarry dump trucks // Mining equipment and technology. 2023, no. 4, pp. 41-55. doi.org/10.26730/2618-7434-2023-4-41-55.
10. Lyubimov O.V., Zakrasovsky D.I., Safina D.A., Ovsyannikov M.O. Determination of loads on the fastening elements of the front axle wheels of a quarry dump truck with a lifting capacity of 220 tons // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2024, no. 4, pp. 42-49. doi.org/10.26730/1999-4125-2024-4-42-49.
11. Ostretsov A.V., Krasavin P.A., Voronin V.V. Tires and wheels for cars and tractors: Textbook. – M.: MSTU "MAMI", 2011. – 85 p.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Дубинкин Дмитрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент	Dubinkin Dmitry Mikhailovich – candidate of technical sciences, associated professor
Закрасовский Дмитрий Иванович – аспирант, младший научный сотрудник научного центра «Цифровые технологии»	Zakrasovsky Dmitry Ivanovich – postgraduate student, junior researcher of research center of digital technologies
zakrasovskydi@kuzstu.ru	

Получена 30.05.2025