

УДК (UDC) 629.35

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ ТЯГОВО-СЦЕПНОГО УСТРОЙСТВА
ДЛЯ БУКСИРОВАНИЯ ТЯЖЕЛОГО ПРИЦЕПАSIMULATION OF THE LOAD OF THE TRACTION DEVICE
FOR TOWING A HEAVY TRAILERШалупина П.И., Рагулина Ю.В.
Shalupina P.I., Ragulina Iu.V.АО «Брянский автомобильный завод» (Брянск, Россия)
Bryansk Automobile Plant JSC (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы моделирования напряженно-деформированного состояния тягово-сцепного устройства, предназначенного для буксирования тяжелого прицепа, на котором размещено оборудование базовой станции мобильного транспортно-перезгрузочного канатного комплекса. Определены основные расчетные нагрузки. Построены геометрические и расчетные конечноэлементные модели, учитывающие особенности металлической конструкции. Применена методика склейки элементов сеточной модели. Учитывается контактное взаимодействие деталей. На основе выполненных расчетов сделаны выводы о соответствии разработанной конструкции требованиям прочности.

Ключевые слова: колесное шасси, тягово-сцепное устройство, напряженно-деформированное состояние

Дата принятия к публикации: 01.04.2021
Дата публикации: 25.06.2021

Сведения об авторах:

Шалупина Павел Игоревич – начальник конструкторского бюро расчетов и надежности АО «Брянский автомобильный завод», e-mail: p.shalupina@gmail.com.

Рагулина Юлия Валерьевна – главный специалист конструкторского бюро расчетов и надежности АО «Брянский автомобильный завод», alekseeva.iulija2014@yandex.ru.

Abstract. The article deals with the issues of modeling the stress-strain state of a traction device designed for towing a heavy trailer, on which the equipment of the base station of a mobile transport and reloading rope complex is placed. The main design loads are defined. Geometric and computational finite element models are constructed, taking into account the features of the metal structure. The method of gluing elements of the grid model is applied. The contact interaction of the parts is taken into account. On the basis of the performed calculations, conclusions are drawn about the compliance of the developed structure with the requirements of strength.

Keywords: wheel chassis, traction device, stress-strain state

Date of acceptance for publication: 01.04.2021
Date of publication: 25.06.2021

Authors' information:

Pavel I. Shalipina – Chief specialist of the Design Bureau of Calculations and Reliability, Bryansk Automobile Plant JSC, e-mail: p.shalupina@gmail.com.

Iulia V. Ragulina – Main of the Design Bureau of Calculations and Reliability, Bryansk Automobile Plant JSC, alekseeva.iulija2014@yandex.ru.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-422.2020.8

Acknowledgements

The study was supported by Presidential Grant for Governmental Support to Young Russian Scientists No. №MD-422.2020.8

1. Введение

Мобильные транспортно-перезгрузочные канатные комплексы используются для выполнения транспортных операций в трудно-

доступной местности, а также в сложных оперативных условиях. Оборудование канатной дороги размещается на мобильных шасси различной конструкции (на колесных или гусеничных шасси) [1-16].

Известны различные варианты компоновки основного оборудования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов на базовом шасси. В том числе, существует вариант применения полуприцепа для размещения активной платформы, устанавливаемой во время работы канатной системы на опорную поверхность [14, 16].

Данный полуприцеп может иметь массу до 30 т, что требует применение тягово-сцепных устройств с высокими техническими характеристиками.

В работе рассмотрен расчет напряженно-деформированного состояния тягово-сцепного устройства для буксировки тяжелого прицепа, на основе результатов которого сделан вывод о соответствии конструкции условиям прочности.

2. Конструкция тягово-сцепного устройства

Конструкция тягово-сцепного устройства показана на рис. 1. Конструкция буксирного прибора, входящего в состав тягово-сцепного устройства, предусматривает применение упругого элемента в виде пружины. Пружина предназначена для снижения динамического воздействия на несущую конструкцию тягача в процессе эксплуатации.

Тягово-сцепное устройство устанавливается на раме тягача (рис. 1, а) в коробке, приваренной к поперечине 1, усиленной ребрами жесткости 2 и 3. Поперечина крепится к лонжеронам 4. Крюк буксирного прибора 5 показан условно в виде сферы.

При воздействии усилия со стороны прицепа на крюк 5 буксирного прибора нагрузка передается через резьбовое соединение между гайкой 9 и шайбой 10. Шайба 10, в свою очередь, передает нагрузку на переднюю втулку пружины 11, которая, взаимодействуя с пружиной 12, перемещается вдоль стержня крюка 5 до упора в упорную втулку 13. В дальнейшем втулка пружины 14 при действии максимального усилия на крюк 5 воспринимает нагрузку от пружины 12 и упорной втулки 13 и передает её на пластину поперечины 6 и далее непосредственно на поперечину 1.

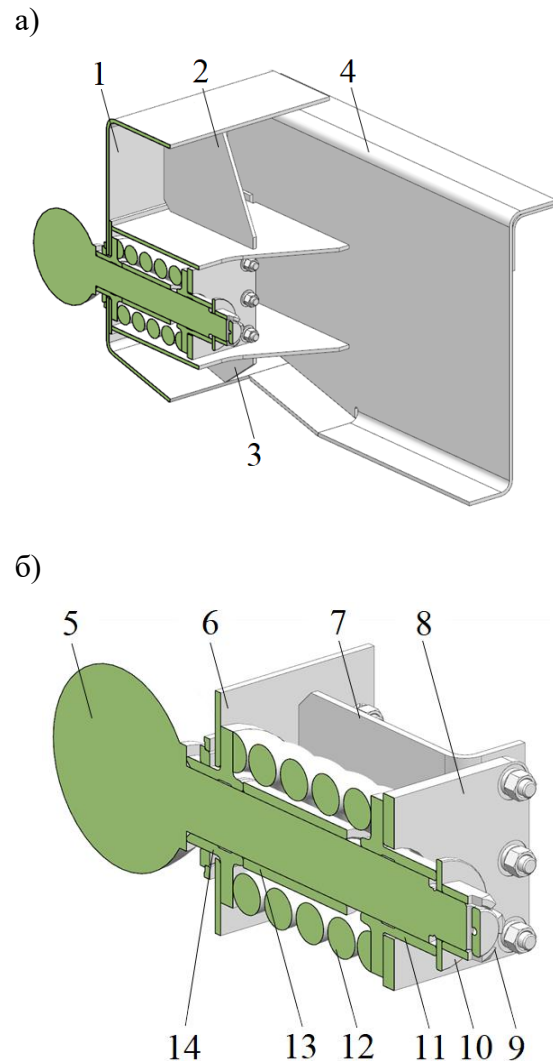


Рис. 1. Конструкция тягово-сцепного устройства для буксировки тяжелого прицепа: а – установка на раме тягача; б – буксирный прибор; 1 – поперечина; 2 – ребро поперечины вертикальное (верхнее); 3 – ребро поперечины вертикальное (нижнее); 4 – лонжерон; 5 – крюк; 6 – пластина поперечины; 7 – упор крышки; 8 – крышка задняя; 9 – гайка; 10 – шайба; 11 – втулка пружины внутренняя; 12 – пружина; 13 – втулка упорная; 14 – втулка пружины

В ходе проектирования тягово-сцепного устройства для буксировки тяжелого прицепа построена идеализированная геометрическая твердотельная модель (рис. 2). Для этого согласно известным методикам [16-18] использовалась система инженерного геометрического моделирования (CAD-система).

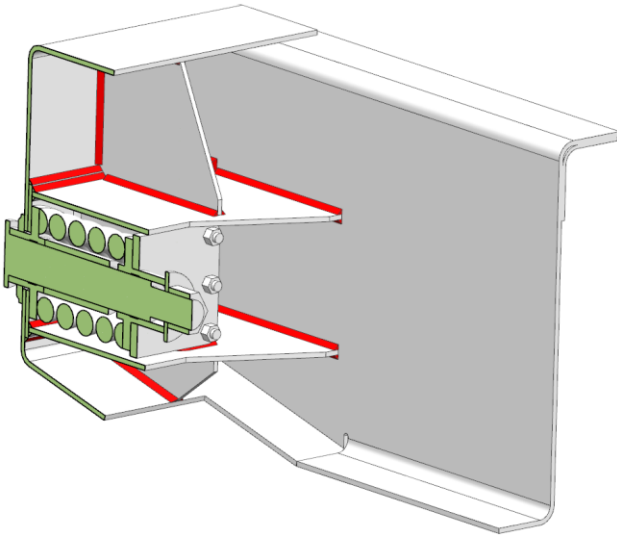


Рис. 2. Идеализированная модель тягово-цепного устройства для буксировки тяжелого прицепа

Исходная геометрическая модель была дополнена сварными швами между соединяемыми деталями. Зазор между свариваемыми деталями принят равным 0,5 мм. Идеализированная модель не учитывает фаски, скругления, галтели и проточки в деталях, поскольку данные конструктивные элементы не оказывают существенного влияния на результаты расчета [16, 17].

3. Определение расчетной нагрузки, действующей на тягово-цепное устройство

Расчет максимального усилия, возникающего при трогании тягача с места с прицепом полной массой 30 т, проводится по методике, описанной в [19]. Нагрузка на сцепке между тягачом и шасси определяется по следующей зависимости:

$$P_{\text{сц}} = m\varphi M_T \left[1 + e^{-\beta\tau} \sqrt{1 + \frac{2\xi c}{m\varphi M_T} \left(\sqrt{\frac{2\xi c}{m\varphi M_T}} - 2\gamma \right)} \right],$$

где c – жесткость пружины, Н/м; m – соотношение масс автопоезда; γ – коэффициент демпфирования, Нс/м; ξ – максимальный зазор в сцепке, м; φ – коэффициент сцепления; M_T – полная масса тягача, кг; β – угловая частота собственных колебаний системы, рад/с, вычисляемая по формуле:

$$\beta = \sqrt{\frac{c}{mM_T}},$$

τ – темп приложения нагрузки [19].

Темп приложения нагрузки определяется следующим образом [19]:

$$\tau = \frac{1}{\beta\sqrt{1-\gamma^2}} \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{1-\gamma^2} \left[\sqrt{\frac{2\xi c}{m\varphi M_T} (1-4\gamma)} + 2\gamma \right]}{\gamma \sqrt{\frac{2\xi c}{m\varphi M_T} (3-4\gamma^2) - (1-2\gamma^2)}}.$$

4. Расчетная модель для исследования напряженно-деформированного состояния тягово-цепного устройства

Моделирование напряженно-деформированного состояния рамы базовой станции мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса выполнено методом конечных элементов [16, 17, 20].

Геометрия идеализированной модели аппроксимирована объемными конечными элементами тетраэдральной и гексаэдральной формы. Общее количество узлов в модели – 166 610, элементов – 400 578.

Взаимодействие деталей в рассматриваемой модели обеспечивается применением специальных объектов моделирования типа «контакт» и «склейка». Коэффициент трения между контактирующими деталями принят 0,15 (для контактных пар «сталь-сталь»).

Сцепное усилие, вычисленное с использованием зависимостей, приведенных в разделе 3, составляет 420 кН и приложено в виде сосредоточенной нагрузки.

Общий вид разработанной конечноэлементной модели представлен на рис. 3.

5. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния тягово-цепного устройства

На рис. 4 показана картина распределения эквивалентных напряжений по Мезису, действующих в элементах исследуемой конструкции. Значения действующих эквивалентных напряжений в характерных точках конструкции приведены в таблице.

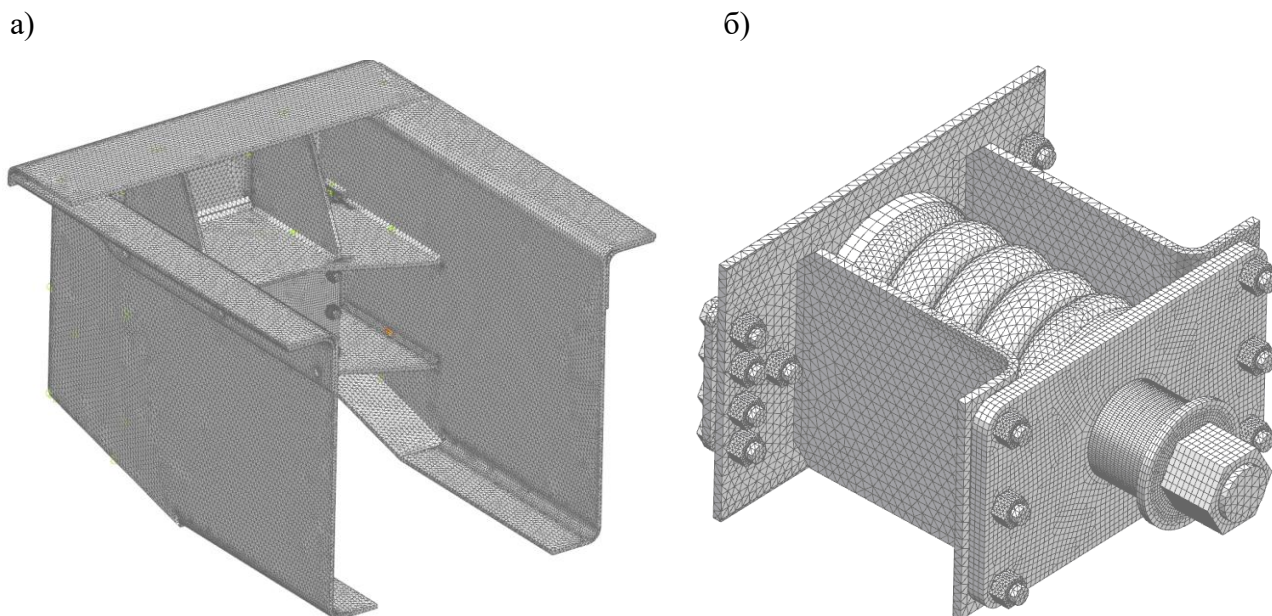


Рис. 3. Конечноэлементная модель тягово-цепного устройства:
 а – часть рамы тягача; б – буксирный прибор

Таблица

Результаты расчета на прочность

Элемент (локализация)	Эквивалентные напряжения, МПа	Допускаемые напряжения, МПа	Коэффициент запаса прочности
Рама (втулка задней крышки буксирного прибора)	331,38	325	1,18
Лонжероны рамы тягача в районе установки тягово-цепного устройства	60,0	325	5,41
Пружина (внутренняя поверхность витка)	1017,60	1225	1,44
Упорная втулка (зона контакта с втулкой пружины)	573,18	654	1,37
Втулка пружины (зона изменения жесткости в контакте между втулкой и стержнем крюка)	255,24	654	3,08
Втулка пружины внутренняя (зона изменения жесткости в контакте между втулкой и стержнем крюка)	446,11	654	1,76
Гайка	745	833	1,34

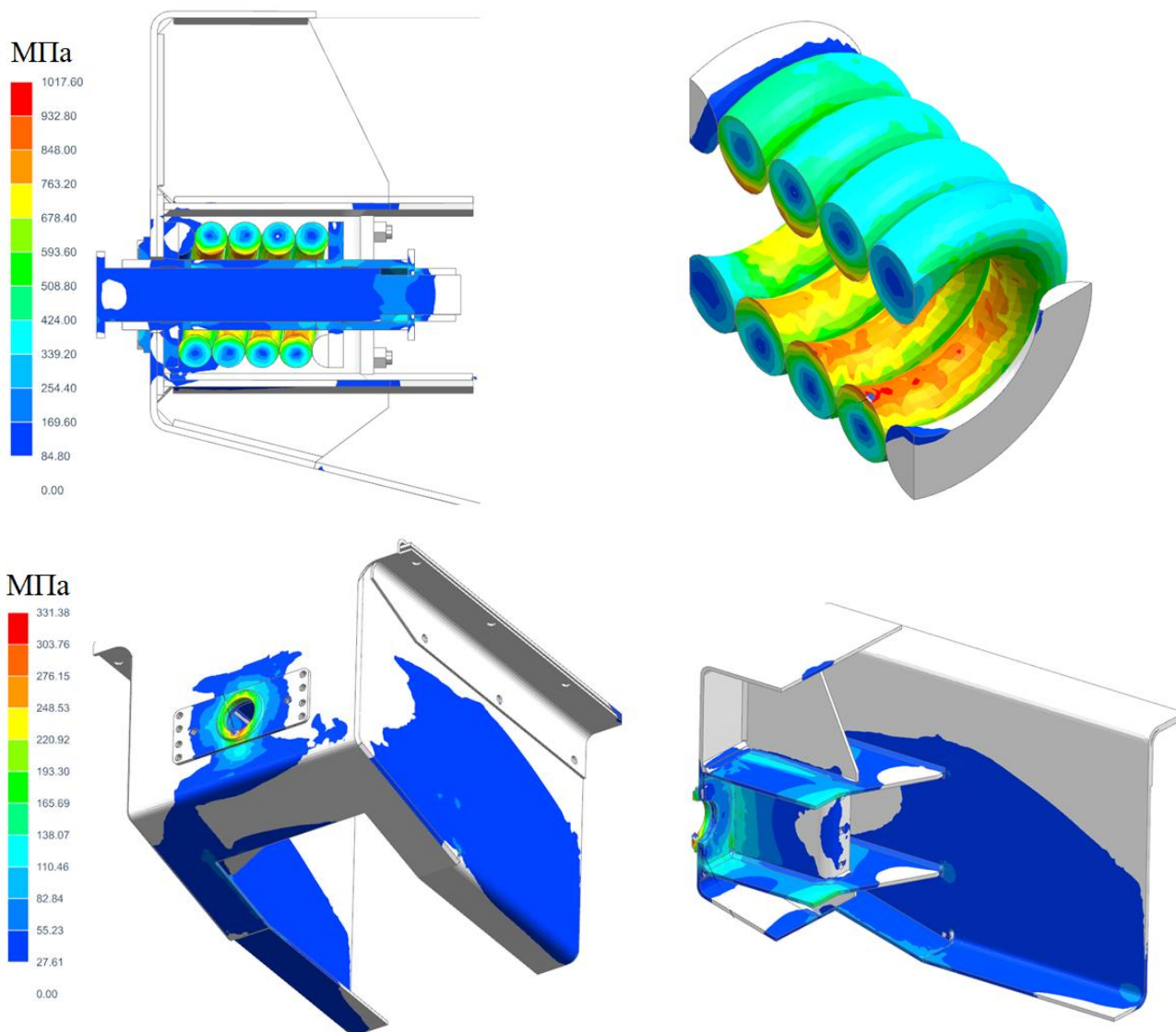


Рис. 4. Эквивалентные напряжения по Мезису в исследуемой системе (в МПа)

6. Основные выводы и рекомендации

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Расчеты тягово-сцепного устройства показали соответствие созданной конструкции требованиям прочности.

2. Наименьший коэффициент запаса прочности во втулке задней крышки буксирного прибора составляет 1,18. При действии сцепных усилий (вплоть до 50 тс в сцепке) неизбежно возникновение незначительных пластических деформаций в конструкциях, которые не оказывают существенного влия-

ния на общую прочность изделия. Таким образом, данный коэффициент запаса прочности является приемлемым в условиях тяжелых кратковременных нагрузок (троганий).

3. Максимальные напряжения возникают на внутренних витках пружины. Однако коэффициент запаса для этого элемента конструкции при использовании рекомендуемой стали марки 60С2ХФА равен 1,44.

4. При разработке комплексных математических моделей [21, 22] рекомендуется разработка подмодели, учитывающей динамические процессы, протекающие в тягово-сцепном устройстве.

Список литературы

1. Пат. 2337023 Рос. Федерация: МПК7 В61В 7/00. Мобильная подвесная канатная дорога / Короткий А.А., Хальфин М.Н., Маслов В.Б. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ. № 2007102705/11; заявл. 24.01.2007; опубл. 27.10.2008, Бюл. 30.
2. Пат. 2465423 Рос. Федерация: МПК7 E04H 3/14. Стадион / Короткий А.А., Приходько В.М. Кустарев Г.В. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ. № 2011112660/03; заявл. 01.04.2011; опубл. 27.10.2012, Бюл. 30.
3. Лагереv А.В., Таричко В.И., Солдатченков С.П. Обеспечение общей устойчивости базовых колесных станций мобильных канатных дорог // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 210-220.
4. Макурин А.Н., Обрядин В.П. К вопросу об использовании мобильных воздушных канатных дорог для аварийно-спасательных работ // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015. № 4. С. 73-77.
5. Лагереv И.А., Таричко В.И., Солдатченков С.П., Игнатов Д.А. Создание экспериментального макета мобильной канатной дороги с использованием 3D-печати // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 221-230.
6. Мехренцев А.В., Герц Э.Ф., Мартинек Я., Новак Л. Канатные трелевочные установки. Екатеринбург, Брно: УГЛТУ, 2012. 19 с.
7. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Оптимальное проектирование линий канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2015. Т.1. № 1. С. 57-65.
8. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Короткий А.А., Панфилов А.В. Концепция инновационной системы городского транспорта «Канатное метро города Брянска» // Вестник Брянского государственного технического

References

1. Patent RU 2337023, B61B 7/00. Mobilnaya podvesnaya kanatnaya doroga [Mobile ropeway]. Korotkiy A.A., Khalphin M.N., Maslov V.B. Published 27.10.2008. (In Russian)
2. Patent RU 2465423, E04H 3/14. Stadion [Stadium]. Korotkiy A.A., Prihodko V.M., Kustarev G.V. Published 27.10.2012. (In Russian)
3. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P. General stability of a base vehicle of a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 210-220. (In Russian)
4. Makurin A.N., Obryadin V.P. K voprosu ob ispolzovanii mobilnykh vozdushnykh kanatnykh dorog dlya avariyno-spasatelnykh rabot (On the use of mobile aerial ropeways for rescue operations). *Nauchnye i obrazovatelnye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2015, No. 4, pp. 73-77. (In Russian)
5. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P., Ignatov D.A. The experimental model creation of a mobile ropeway by 3D-printing. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 221-230. (In Russian)
6. Mekhrentsev A.V., Gerts E.F., Martinek Ya., Novak L. *Kanatnye trelevochnye ustanovki* [Cable skidders]. Ekaterinburg, Brno, UGLTU, 2012. 19 p. (In Russian)
7. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of cable subway lines in a highly urbanized city environment. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2015, Vol.1, No.1, pp. 57-65. (In Russian)
8. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Korotkiy A.A., Panfilov A.V. Innovation transport system "Bryansk rope metro". *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No. 3, pp. 12-15. (In Russian)
9. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Cable transport system "Kanatnoe metro" towers distance optimization. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, No.4, pp. 22-30.
10. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V. *Razvitie transportnoy infrastruktury krupnykh gorodov i territoriy na osnove tekhnologii kanatnogo*

университета. 2012. №3. С. 12-15.

9. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Оптимизация шага установки промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро // Вестник Брянского государственного университета. 2014. № 4. С. 22-30.

10. Короткий А.А., Лагерев А.В., Месхи Б.Ч., Лагерев И.А., Панфилов А.В. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро. Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2017. 344 с.

11. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Моделирование режимов работы гидроприводов с частотно-дрессельным регулированием мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С. 462-480.

12. Лагерев И.А., Таричко В.И., Лагерев А.В. Формирование стратегии восстановления канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса в процессе эксплуатации // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 276-293.

13. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Вероятностно-временной анализ кинетики показателей надежности на стадии проектирования канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 256-275.

14. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Компонировка технологического оборудования на базовом шасси мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №3. С. 388-403.

15. Лагерев И.А., Лагерев А.В. Современная теория манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Конструкции и условия эксплуатации. Брянск: РИО БГУ, 2018. 190 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1294622>

metro [The development of transport infrastructure of large cities and territories on the basis of technology of passenger ropeways]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2017. 344 p. (In Russian)

11. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Modeling operation modes of hydraulic drives with frequency-throttle regulation of mobile transport and overloading ropes complexes. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 462-480. (In Russian)

12. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Lagerev A.V. Formation of the strategy for restoring the rope system of the mobile transport and reloading rope complex during operation. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 276-293. (In Russian)

13. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Probability-temporal analysis of reliability indicators kinetics at the stage of designing a rope system of a mobile transport and reloading ropeway. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 256-275. (In Russian)

14. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Placement of technological equipment on the basic chassis of the mobile transportation and reloading rope complex. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.3, pp. 388-403. (In Russian)

15. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Sovremennaya teoriya manipulatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselevykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov. Konstruktsiya i usloviya ekspluatatsii* [Modern theory of manipulation systems of mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes. Design and operating conditions]. Bryansk, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, 2018. 190 p. (In Russian)

16. Tarichko V.I., Shalupina P.I. Load simulation of a semi-trailer of the mobile transport and overloading rope complex. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.1, pp. 73-81. (In Russian)

16. Таричко В.И., Шалупина П.И. Моделирование нагруженности полуприцепа мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №1. С. 73-81. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-07-01-73-81

16. Вершинский А.В., Лагерев И.А., Шубин А.Н., Лагерев А.В. Численный анализ металлических конструкций подъемно-транспортных машин. Брянск: РИО БГУ, 2014. 186 с.

17. Вершинский А.В., Лагерев И.А., Шубин А.Н., Лагерев А.В. Расчет металлических конструкций подъемно-транспортных машин методом конечных элементов. Брянск: РИО БГУ, 2015. 210 с.

18. Киятина И.И., Лагерев И.А. Формирование компетенций в области современных сквозных цифровых технологий у обучающихся по направлению «Реклама и связи с общественностью» // Ученые записки Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 11-15.

19. Щукин М.М. Сцепные устройства автомобилей и тягачей // Машиностроение, 1960. 209 с.

20. Лагерев И.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния крана-манипулятора машины для сварки трубопроводов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. №4. С. 29-36.

21. Таричко В.И., Химич А.В. Комплексная математическая модель мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С. 523-532. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-523-532

22. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Конструкции и основы проектирования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2020. 207 с.

16. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Chislennyi analiz metallicheskih konstruksii podemno-transportnykh maschin* [Numerical analysis of metal constructions of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2014. 186 p. (In Russian).

17. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Raschet metallicheskih konstruksii podemno-transportnykh maschin metodom konechnykh elementov* [Calculation of metal structures of lifting and transport machines by the finite element method]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2015. 210 p. (In Russian).

18. Kiyutina I.I., Lagerev I.A. Formation of competencies in the field of modern end-to-end digital technologies for students in the direction of PR, *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 11-15. (In Russian)

19. Schukin M.M. *Stsepnnye ustroistva avtomobilei i tyagatchei* [Coupling devices of cars and tractors]. Mashinostroenie, 1960. 209 p. (In Russian).

20. Lagerev I.A. Simulation of stress-strain state in crane-manipulator of pipeline welding machine. *Izvestiya vyshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, 2011, No.4, pp. 29-36. (In Russian)

21. Tarichko V.I., Khimich A.V. Comprehensive model of the mobile transport and overloading rope complex. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 523-532. (In Russian)

22. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Konstruksii i osnovy proektirovaniya mobilnykh transportno-pergruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Structures and design basics of mobile transport and reloading rope complexes]. Bryansk, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, 2020. 207 p.