

УДК (UDC) 621.86

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ ПОЛУПРИЦЕПА МОБИЛЬНОГО
ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОГО КАНАТНОГО КОМПЛЕКСАLOAD SIMULATION OF A SEMI-TRAILER OF THE MOBILE TRANSPORT
AND OVERLOADING ROPE COMPLEXТаричко В.И., Шалупина П.И.
Tarichko V.I., Shalupina P.I.АО «Брянский автомобильный завод» (Брянск, Россия)
Bryansk Automobile Plant JSC (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы моделирования напряженно-деформированного состояния полуприцепа, предназначенного для размещения оборудования мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса. Определены основные расчетные случаи. Построены геометрические и расчетные конечноэлементные модели, учитывающие особенности металлической конструкции и элементов подвески. Применена методика склейки элементов сеточной модели. На основе выполненных расчетов сделаны выводы о соответствии разработанной конструкции требованиям прочности и жесткости.

Ключевые слова: мобильная канатная дорога, шасси, полуприцеп, напряженно-деформированное состояние.

Дата принятия к публикации: 28.01.2021
Дата публикации: 25.03.2021

Сведения об авторах:

Таричко Вадим Игоревич – кандидат технических наук, заместитель генерального директора – главный конструктор АО «Брянский автомобильный завод», e-mail: 32.6909@mail.ru.

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

Abstract. The article deals with the issues of modeling the stress-strain state of a semi-trailer designed to accommodate the equipment of a mobile transport and overloading rope complex. The main computational cases are determined. Geometric and computational finite element models are constructed, taking into account the features of the metal structure and suspension elements. The method of gluing elements of the grid model is applied. On the basis of the performed calculations, conclusions are drawn about the compliance of the developed structure with the requirements of strength and rigidity.

Keywords: mobile ropeway, chassis, semi-trailer, stress-strain state.

Date of acceptance for publication: 28.01.2021
Date of publication: 25.03.2021

Authors' information:

Vadim I. Tarichko – Candidate of Technical Sciences, Deputy general director – General designer, Bryansk Automobile Plant JSC, e-mail: 32.6909@mail.ru.

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

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-перегрузочные канатные комплексы предназначены для перевозки грузов и пассажиров в условиях труднодоступной местности и в сложных опе-

ративных условиях. Оборудование канатной дороги (канатные шкивы, мачты, натяжные устройства, тяговые и несущие канаты, приводы) размещаются на мобильных шасси различной конструкции (на колесных или гусеничных шасси) [1-13].

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]. При работе канатной дороги полуприцеп не воспринимает внешние нагрузки, действующие со стороны канатной дороги [14, 15].

В работе рассмотрен расчет напряженно-деформированного состояния полуприцепа в транспортном состоянии, на основе результатов которого сделан вывод о соответствии конструкции условиям прочности и жесткости.

2. Конструкция полуприцепа

Рассматриваемый полуприцеп является универсальным и может использоваться для размещения широкого спектра технологического оборудования.

В ходе проектирования полуприцепа была построена его геометрическая твердотельная модель (рис. 1). Для этого согласно методикам [16-18] использовалась система инженерного геометрического моделирования (CAD-система).

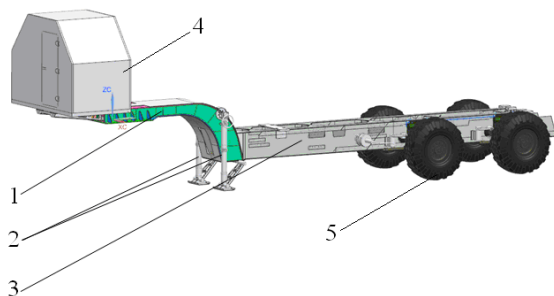


Рис. 1. Геометрическая твердотельная модель полуприцепа: 1 – гусак, 2 – опоры, 3 – рама; 4 – кабина для размещения оборудования управления мобильного транспортно-технологического канатного комплекса; 5 – ходовые колеса

Основные эксплуатационные нагрузки воспринимает рама 3, состоящая из ряда лонжеронов. Полуприцеп соединяется с тягачом через гусак 1. Прицеп опирается на опоры 2 и колеса 5.

Элементы конструкции гусака полуприцепа изготавливаются из стали марки 09Г2, элементы конструкции лонжеронов – 16Г2АФ или аналогов.

3. Расчетные сочетания нагрузок

В ходе расчета учитывались две группы расчетных режимов:

- режим I – оценка прочности изделия при транспортных перегрузках,
- режим II – оценка прочности изделия в статических режимах при различных вариантах нагрузок.

Для режима I расчет выполняется на основе трехмерной твердотельной модели с учетом следующих нагрузок:

- транспортные перегрузки – $n_x = 1$ (вперед), $n_y = -3$ (вниз);
- весовая нагрузка от груза массой $m_{CP1} = 15500$ кг, приложенная в центре масс;
- собственный вес подрессоренной массы полуприцепа $m_{CP2} = 5500$ кг.

Для режима II расчет выполняется на основе трехмерной твердотельной модели с учетом следующих нагрузок:

- собственный вес полуприцепа массой $m_{II} = 6900$ кг.

В расчетах учитывается три наиболее опасных варианта положения центра масс системы.

3. Расчетная модель для исследования напряженно-деформированного состояния полуприцепа

Моделирование напряженно-деформированного состояния полуприцепа выполнено методом конечных элементов с учетом рекомендаций [16-17].

На основе геометрической твердотельной модели (рис. 1) разработана идеализированная (упрощенная) модель, представляющая собой совокупность оболочечных тел. Расположение оболочек соответствует положению срединных поверхностей листовых тел. Из модели исключены элементы, не влияющие на точность расчета. Общий вид идеализированной геометрической модели представлен на рис. 2.

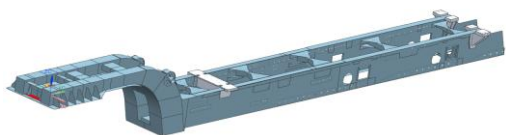


Рис. 2. Идеализированная геометрическая модель полуприцепа

На основе идеализированной геометрической модели построена расчетная конечно-элементная модель полуприцепа (рис. 3).

Средний размер плоских конечных элементов равен 15 мм. Общее количество элементов – 262961, количество узлов – 326412.

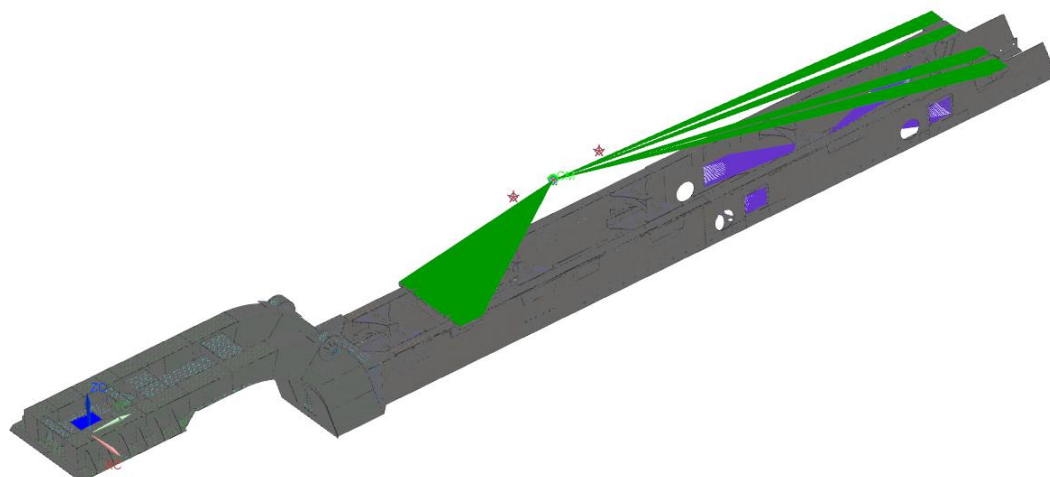


Рис. 3. Расчетная конечноэлементная модель полуприцепа

Весовая нагрузка от груза моделировалась в виде сосредоточенной массы с использованием 0D-сетки CONM2-элементами. Сосредоточенные нагрузки прикладывались к вспомогательным узлам, которые, в свою очередь, связывались с верхними гранями кронштейнов RBE3-элементами (рис. 4).

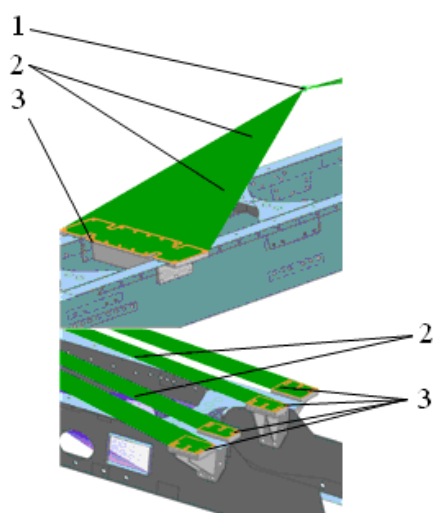


Рис. 4. Моделирование связи кронштейнов и сосредоточенных масс:

1 – вспомогательный узел; 2 – RBE3-элементы; 3 – верхние грани кронштейнов

Конечноэлементная модель закреплена в двух точках: в точке опоры гусака на соединительное устройство и в точках опирания на оси подвески.

Для удобства приложения силовых и кинематических граничных условий втулка в точке опоры на соединительное устройство выполнена в упрощенном виде. Затем смоделировано 1D-соединение (в точке создан вспомогательный узел, соединенный с внутренней гранью RBE2-элементами).

Соединение кронштейнов в модели выполнено следующим образом:

- между гранями кронштейнов и гранями лонжеронов моделируется соединение типа склейка (рис. 5, а);

- между составными частями кронштейнов моделируется соединение типа склейка (рис. 5, б);

- сварные швы в конструкции лонжеронов моделируются соединением типа склейка методом «склейка поверхность с поверхностью» (рис. 6);

- сварные швы проушины крепления моделируются соединением типа склейка методом «склейка поверхность с поверхностью».

б)



Рис. 5. Моделирование соединений кронштейнов: а – соединение кронштейнов с лонжеронами рамы; б – соединение составных частей кронштейнов

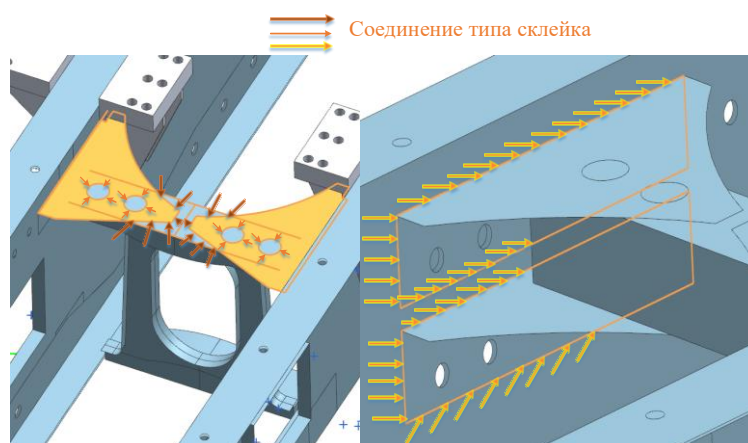


Рис. 6. Моделирование сварных швов в конструкции лонжеронов

Результат построения конечноэлементной модели полуприцепа показан на рис. 7.

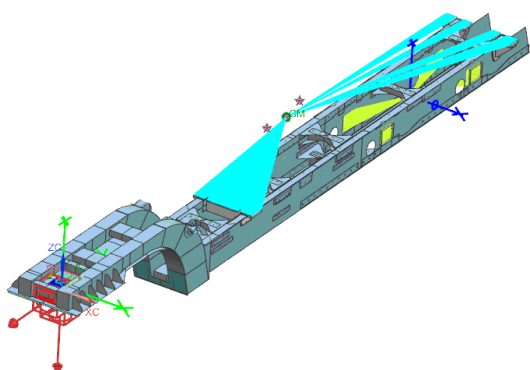


Рис. 7. Итоговая конечноэлементная модель полуприцепа

Для учета влияния подвески полуприцепа при расчете режима I использовалась следующая модель (рис. 8). Подвеска моделировалась при помощи 1D-соединений. Верхние и нижние рычаги, торсионы, стяжки верхних

и нижних рычагов, палец крепления амортизатора, связки представлялись с помощью СВЕАМ-элементов. Шины и амортизаторы моделировались RBUSH1D-элементами.



Рис. 8. Модель подвески полуприцепа

4. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния полуприцепа

На рис. 9 представлена общая картина напряженно-деформированного состояния полуприцепа для режима I, полученная с помощью представленной методики.

Результаты расчета полуприцепа для выбранных расчетных режимов сведены и обобщены в табл. 1 и табл. 2.

Результаты конечноэлементных расчетов полуприцепа подтверждаются с помощью упрощенных аналитических зависимостей, с помощью которых сопоставлялись усилия в опорах (табл. 3).



Рис. 9. Распределение эквивалентных напряжений в металлоконструкции (режим I)

Таблица 1

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния полуприцепа (режим I)

Элемент конструкции	Предел текучести σ_T , МПа	Максимальные напряжения σ_{max} , МПа	Коэффициент запаса прочности n	Максимальные перемещения, мм
Гусак	325	201	1,6	12
Лонжероны	390	272	1,4	12,5

Таблица 2

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния полуприцепа (режим II)

Деталь / элемент конструкции	Предел текучести σ_T , МПа	Максимальные напряжения σ_{max} , МПа	Коэффициент запаса прочности n	Максимальные перемещения, мм
Гусак	325	76,3	4,3	5,4
Лонжероны	390	230,8	1,7	7,6

Таблица 3

Сравнение результатов расчета усилий в опорах численно и аналитически

Метод расчета	Максимальное усилие P , Н	Максимальное усилие P , кгс
Расчет методом конечных элементов	Режим II: 1-й случай загрузки $m_{CP1} = 11400$ кг	
	72595	7400
Аналитический метод	Максимальное усилие P , кгс	
	7508	

5. Основные выводы и рекомендации

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Построение конечноэлементных моделей с использованием соединений типа «склейка» позволяет на 40...50% ускорить построение моделей по сравнению с ручной сшивкой сеток на смежных элементах.

2. Спроектированная конструкция полуприцепа удовлетворяет требованиям прочности и жесткости. Максимальные значения действующих эквивалентных напряжений не превышают 270...280 МПа. При этом обес-

печивается запас прочности не ниже 1,4. Суммарные перемещения элементов конструкции не превышают 12,5 мм, что соответствует допустимым значениям (до 30 мм).

3. Спроектированный полуприцеп может применяться для размещения оборудования мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса.

4. При разработке комплексных математических моделей [20] рекомендуется разработка подмодели взаимодействия полуприцепа и тягача, параметры которой могут быть определены с использованием результатов представленного исследования.

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., Солдatchенков С.П. Обеспечение общей устойчивости базовых колесных станций мобильных канатных дорог // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 210-220. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-210-220>.

4. Макурин А.Н., Обрядин В.П. К вопросу об использовании мобильных воз-

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-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 210-220. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-210-220 (In Russian)

4. Makurin A.N., Obryadin V.P. K voprosu ob ispolzovanii mobilnykh vozdushnykh kanatnykh dorog dlya avariyno-spatatelnykh rabot [On the use of mobile aerial ropeways for rescue operations]. *Nauchnye i obrazovatelnye problemy grazhdanskoj 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

душных 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. – DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-221-230>.

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 университета. 2012. №3. С. 12-15. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302025>

9. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Оптимизация шага установки промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро // Вестник Брянского государственного университета. 2014. № 4. С. 22-30. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302237>

10. Короткий А.А., Лагереv А.В., Месхи Б.Ч., Лагереv И.А., Панфилов А.В. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро. Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2017. 344 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913>

11. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv 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. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-

3D-printing. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 221-230. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-221-230 (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)

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302025>

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 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. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913> (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-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 462-480. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480 (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-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 276-293. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293 (In Russian)

13. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev

04-462-480

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. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293

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. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275>

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. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-388-403

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>

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

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-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 256-275. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275> (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-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.3, pp. 388-403. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-388-403 (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. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1294622>. (In Russian)

16. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Chislennyi analiz metallicheskh konstruktsii podemno-transportnykh mashin* [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 metallicheskh konstruktsii podemno-transportnykh mashin 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,

Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 11-15.

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

20. 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

pp. 11-15. (In Russian)

19. 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)

20. Tarichko V.I., Khimich A.V. Comprehensive model of the mobile transport and overloading rope complex. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 523-532. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-523-532 (In Russian)