

УДК (UDC) 625.1/5

СИЛОВОЙ РАСЧЕТ МЕХАНИЗМА КАНАТНОЙ ФИКСАЦИИ КОНЦЕВОЙ ОПОРЫ  
МОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОГО КАНАТНОГО КОМПЛЕКСАFORCE CALCULATION OF THE FASTENING MECHANISM OF THE END TOWER OF  
A MOBILE TRANSPORT AND RELOADING ROPE UNIT USING A HOLDING ROPEТаричко В.И.<sup>1</sup>, Лагереv А.В.<sup>2</sup>, Лагереv И.А.<sup>3</sup>  
Tarichko V.I.<sup>1</sup>, Lagerev A.V.<sup>2</sup>, Lagerev I.A.<sup>3</sup><sup>1</sup> - АО «Конструкторское бюро специального машиностроения» (Санкт-Петербург, Россия)<sup>2</sup> - Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)<sup>3</sup> - Кубанский государственный технологический университет (Краснодар, Россия)<sup>1</sup> - OJSC «Special Design Bureau of machine building» (Saint Petersburg, Russian Federation)<sup>2</sup> - Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)<sup>3</sup> - Kuban State Technological University (Krasnodar, Russian Federation)

**Аннотация.** Мобильные транспортно-перезрузочные канатные комплексы на базе специальных самоходных колесных шасси повышенной грузоподъемности и проходимости являются в настоящее время перспективным видом канатных транспортных технологий для проведения логистических операций в сложных природных условиях при необходимости их быстрого развертывания. Однако вопросы проектирования и анализа рабочих процессов, протекающих в основном технологическом оборудовании указанных комплексов при эксплуатации однопролетных мобильных канатных дорог маятникового типа, еще исследованы в недостаточной степени. В данной статье представлена математическая модель, предназначенная для проведения силового расчета механизма канатной фиксации концевой опоры во время эксплуатации мобильного транспортно-перезрузочного канатного комплекса. Модель позволяет определить величину усилия в удерживающем канате и опорные реакции в узлах крепления концевой опоры и канатной лебедки в зависимости от конструктивных размеров механизма и опоры, эксплуатационной нагрузки со стороны несущей-тяговой канатной системы мобильной канатной дороги, пространственной ориентации канатного шкива и других параметров. Также представлен анализ полученных количественных результатов тестового силового расчета механизма канатной фиксации концевой опоры и сформулированы соответствующие рекомендации.

**Ключевые слова:** мобильная канатная дорога, мобильная канатная установка, канатная фиксация, концевая опора, силового расчет.

**Дата принятия к публикации:** 22.05.2023  
**Дата публикации:** 25.06.2023

**Сведения об авторах:**

**Таричко Вадим Игоревич** – кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора, АО «Конструкторское бюро специального машино-

**Abstract.** Mobile transport and reloading rope units based on special self-propelled wheeled chassis with increased load capacity and cross-country capability are currently a promising type of rope transport technologies for logistics operations in difficult natural conditions, if necessary, their rapid deployment. However, the issues of designing and analyzing the work processes occurring in the main technological equipment of these units during the operation of single-span mobile ropeways of the pendulum type have not yet been sufficiently investigated. This article presents a mathematical model designed to perform a force calculation of the mechanism of rope fixation of the end tower during the operation of a mobile transport and reloading rope unit. The model makes it possible to determine the magnitude of the force in the holding rope and the support reactions in the attachment points of the end tower and the rope winch, depending on the design dimensions of the mechanism and the tower, the operational load from the carrying-traction rope system of the mobile ropeway, the spatial orientation of the rope pulley and other parameters. The analysis of the obtained quantitative results of the test force calculation of the rope fixation mechanism of the end tower is also presented and appropriate recommendations are formulated.

**Keywords:** mobile ropeway, mobile rope unit, rope fixation, end tower, force calculation.

**Date of acceptance for publication:** 22.05.2023  
**Date of publication:** 25.06.2023

**Authors' information:**

**Vadim I. Tarichko** – Candidate of Technical Sciences, Deputy general designer, OJSC Special Design Bureau of machine building, e-mail: 32.6909@mail.ru.

строения», e-mail: 32.6909@mail.ru

ORCID: ID/0000-0003-0286-725X

**Лагерев Александр Валерьевич** – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе НИИ фундаментальных и прикладных исследований ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

ORCID: 0000-0003-0380-5456

**Лагерев Игорь Александрович** – доктор технических наук, доцент, и.о. ректора ФГБОУ ВО «Кубанский государственный технологический университет», e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-0921-6831

ORCID: ID/0000-0003-0286-725X

**Alexander V. Lagerev** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice director of Research Institute of Fundamental and Applied Research, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, e-mail: bsu-avl@yandex.ru.

ORCID: 0000-0003-0380-5456

**Igor A. Lagerev** - Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Rector at Kuban State Technological University, e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-0921-6831

### Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-00798)

### Acknowledgements

The study was supported by the grant of Russian science Foundation (project No. 22-29-00798)

## 1. Введение

В настоящее время канатные системы, использующие принцип передачи движения с помощью гибких стальных канатов, применяются в качестве ключевого конструктивного элемента при создании транспортного и перегрузочного оборудования для решения различных логистических задач. Это обусловлено существенными технико-экономическими, социальными и экологическими достоинствами транспортного оборудования на основе канатных технологий [1, 2].

В последние десятилетия наблюдается рост интереса к канатному транспорту для организации как пассажирских, так и грузовых или грузо-пассажирских перевозок [3, 4]. Это связано с развитием в современном мире таких глобальных процессов, как повышение значимости экологических требований при оценке качества функционирования промышленных и социальных объектов или охраняемых природных экосистем [5, 6], реализация концепции «Умный город» [7, 8], переход к технологиям Индустрии 4.0 применительно к сфере транспорта [9], востребованность освоения труднодоступных и отдаленных природных территорий со сложным рельефом [10].

В настоящее время канатные транспортные технологии реализуются в виде двух технических концепций – стационарных канатных дорог и мобильных канатных дорог.

Наибольшее распространение получили стационарные канатные дороги, которые нашли широкое применение во многих отраслях промышленности (горной, металлургической, энергетической, строительной, лесной, сельскохозяйственной и др.) [11-13], в качестве систем городского внеуличного общественного транспорта, как транспортный элемент спортивной, туристической или рекреационной инфраструктуры [1, 2, 6, 14]. Их принципиальной особенностью является работа на одном месте установки в течение всего срока эксплуатации, изменение места установки производится, как правило, в исключительных случаях.

На практике достаточно часто возникают транспортно-логистические задачи, требующие мобильности используемого технологического оборудования [2]. К таким задачам можно отнести проведение транспортно-перегрузочных работ на труднодоступных или экологически уязвимых территориях, при отсутствии необходимой транспортной инфраструктуры, территориях с неблагоприятным природным рельефом, в зонах разрушений природных или техногенных аварий и др. Для решения указанных задач естественным конструктивно-функциональным аналогом стационарных канатных дорог являются мобильные канатные дороги [15]. Специальные многоосные колесные самоходные шасси российского производства и полуприцепы стандартной конструкции, обладающие по-

вышенной грузоподъемностью и проходимостью, по своим техническим характеристикам пригодны для размещения на них основного технологического оборудования для обеспечения работы однопролетных мобильных канатных дорог [15, 16].

## 2. Модели и методы

Согласно представленной в [15] классификации известных в настоящее время мобильных транспортно-технологических канатных комплексов, канатная фиксация концевой опоры в рабочем положении в процессе эксплуатации мобильной канатной дороги может выполняться для следующих вариантов конструктивного исполнения указанных мобильных комплексов:

- с концевым расположением концевой опоры канатной системы с опиранием на несущую раму самоходного колесного шасси [17];

- с выносным расположением концевой опоры канатной системы с опиранием на грунт [18].

Для указанных вариантов конструктивного исполнения мобильных комплексов канатная фиксация может иметь следующие варианты комплектации [15]:

- с одинарным подъемным гидроцилиндром и одноветвевым удерживающим канатом;

- с одинарным подъемным гидроцилиндром и двухветвевым удерживающим канатом;

- со сдвоенными параллельно установленными и синхронно работающими гидроцилиндрами одинакового типоразмера и одноветвевым удерживающим канатом;

- со сдвоенными параллельно установленными и синхронно работающими гидроцилиндрами одинакового типоразмера и двухветвевым удерживающим канатом.

Общая последовательность расчетных действий, направленных на проведение силового расчета механизма канатной фиксации концевой опоры в рабочем положении, совпадает при рассмотрении обоих перечисленных вариантов конструктивного исполнения мобильных транспортно-технологических канатных комплексов, однако конкретная форма расчетных зависимостей будет отличаться.

В данном исследовании был рассмотрен вариант конструктивного исполнения с концевым расположением концевой опоры канатной системы с опиранием на несущую раму самоходного колесного шасси и оба варианта комплектации механизма канатной фиксации – с одно- и двухветвевым удерживающим канатом. Общий вид рассмотренного мобильного транспортно-технологического канатного комплекса приведен на рис. 1 и 2 [1].

На рис. 1 и 2 цифровые обозначения соответствуют следующим конструктивным элементам: 1 - надрамная конструкция; 2 - несущая рама; 3 - самоходное колесное шасси (самоходная концевая станция мобильной канатной дороги); 4 - концевая опора; 5 - подъемный гидроцилиндр; 6 – шток подъемного гидроцилиндра; 7 - канатный шкив; 8 - несущее-тяговый канат; 9 - транспортная стойка; 10 – шарнирный узел крепления удерживающего каната; 11 – удерживающий канат; 12 – канатная лебедка с электроприводом вращения барабана; 13 – выносная опора; 14 – анкерное устройство; 15 – уравнительный блок; 16 – соединительная муфта; 17 – обойма уравнительного блока; элемент I – механизм поворота канатного шкива.

Основной технической задачей, решаемой с помощью канатной фиксации концевой опоры, является ограничение функционального назначения подъемных гидроцилиндров: их единственной задачей является подъем концевой опоры из исходного транспортного положения в требуемое рабочее положение, тогда как задача фиксации концевой опоры в процессе эксплуатации мобильного канатного комплекса исключается. Задача фиксации концевой опоры возлагается на удерживающий канат, который и воспринимает всю эксплуатационную нагрузку от натяжения несущее-тягового каната, веса самого каната и транспортируемого груза, ветровой нагрузки и сил инерции. Это позволяет существенно снизить массогабаритные характеристики приводных гидроцилиндров и мощность насосной установки гидросистемы мобильного комплекса вследствие существенного уменьшения расчетных нагрузок, которые должны преодолевать подъемные гидроцилиндры. Это также

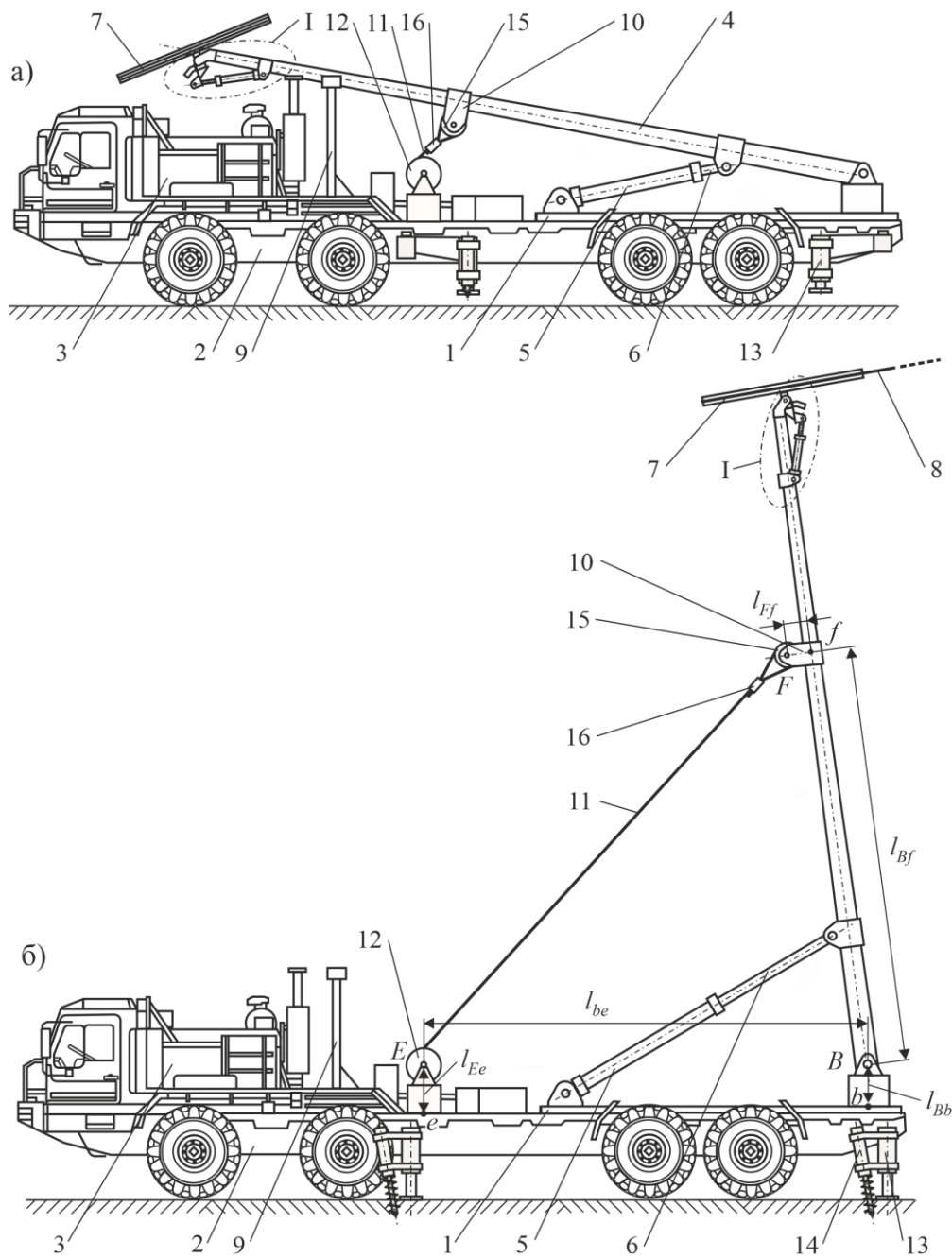


Рис. 1. Общий вид сбоку рассмотренного мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса [15]: а – в транспортном положении; б – в рабочем положении

позволяет снизить опорные реакции в элементах несущей металлоконструкции самоходного колесного шасси, так как использование удерживающего каната дает возможность конструктору существенно увеличить плечо действия силы натяжения каната, воспринимающей эксплуатационные нагрузки, и, таким образом, снизить величину указанной силы, а также величину опорных реакций и локальной нагруженности несущей металлоконструкции.

Основной технической задачей, решаемой с помощью канатной фиксации концевой опоры, является ограничение функционального назначения подъемных гидроцилиндров: их единственной задачей является подъем концевой опоры из исходного транспортного положения в требуемое рабочее положение, тогда как задача фиксации концевой опоры в процессе эксплуатации мобильного канатного комплекса исключается. Задача фиксации концевой опоры возлагается на удерживающий канат, который и вос-

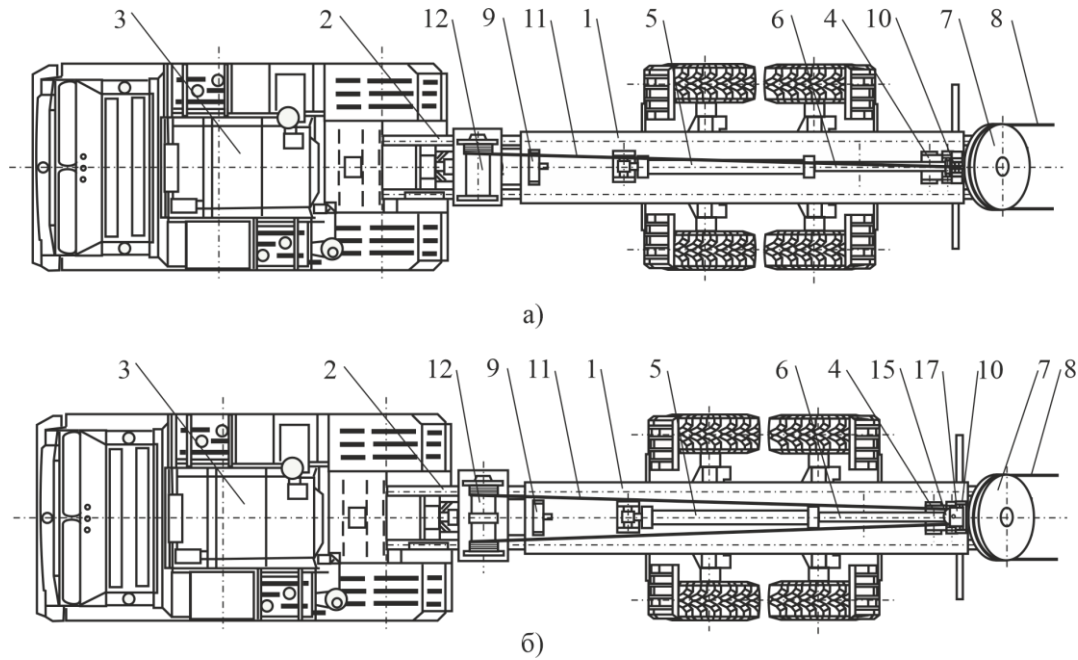


Рис. 2. Общий вид сверху рассмотренного мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса с одинарным подъемным гидроцилиндром [15]: а – при одноветвевом удерживающем канате; б – при двухветвевом удерживающем канате

принимает всю эксплуатационную нагрузку от натяжения несущего каната, веса самого каната и транспортируемого груза, ветровой нагрузки и сил инерции. Это позволяет существенно снизить массо-габаритные характеристики приводных гидроцилиндров и мощность насосной установки гидросистемы мобильного комплекса вследствие существенного уменьшения расчетных нагрузок, которые должны преодолевать подъемные гидроцилиндры. Это также позволяет снизить опорные реакции в элементах несущей металлоконструкции самоходного колесного шасси, так как использование удерживающего каната дает возможность конструктору существенно увеличить плечо действия силы натяжения каната, воспринимающей эксплуатационные нагрузки, и, таким образом, снизить величину указанной силы, а также величину опорных реакций и локальной нагруженности несущей металлоконструкции.

На рис. 3 приведены расчетные схемы для силового расчета механизма подъема и фиксации концевой опоры в рабочем положении при канатной фиксации опоры при использовании одноветвевых канатов. Продольное осевое усилие  $R_r$ , которое воспринимается удерживающим канатом в процес-

се работы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса, должно обеспечивать фиксацию концевой опоры в требуемом рабочем положении с учетом суммарной действующей на канатный шкив нагрузки  $T_r$ , а также веса канатного шкива с элементами механизма его ориентации  $G_{rp}$  и распределенного веса металлоконструкции опоры  $g_t$ . Усилие  $R_r$  в удерживающем одно- или двухветвевом канате составляет:

- при  $\gamma_{wb} \leq \gamma_w \leq \gamma_{br}$

$$R_r = k_R \frac{T_r \cos \alpha_{rp} - (G_{rp} + 0,5g_t H_t) \cos \gamma_w}{n_{br}(l_{Bf} - l_{Ff} \cos \beta_r) \sin \beta_r} H_t;$$

- при  $\gamma_{br} < \gamma_w \leq \gamma_{w,max}$

$$R_r = k_R \frac{T_r \cos \alpha_{rp} - M_{br}/H_t - (G_{rp} + 0,5g_t H_t) \cos \gamma_w}{n_{br}(l_{Bf} - l_{Ff} \cos \beta_r) \sin \beta_r} H_t,$$

где  $k_R$  - коэффициент запаса;  $H_t$  - высота концевой опоры;  $M_{br}$  - тормозной момент, создаваемый внешним тормозным устройством против самопрокидывания концевой опоры;  $n_{br}$  - число ветвей удерживающего каната;  $l_{Bf}$ ,  $l_{Ff}$  - расстояния между точками  $B$  и  $f$ ,  $F$  и  $f$ ;  $\gamma_w$  - угол наклона концевой опоры в рабочем положении;  $\gamma_{w,max}$  - максималь-

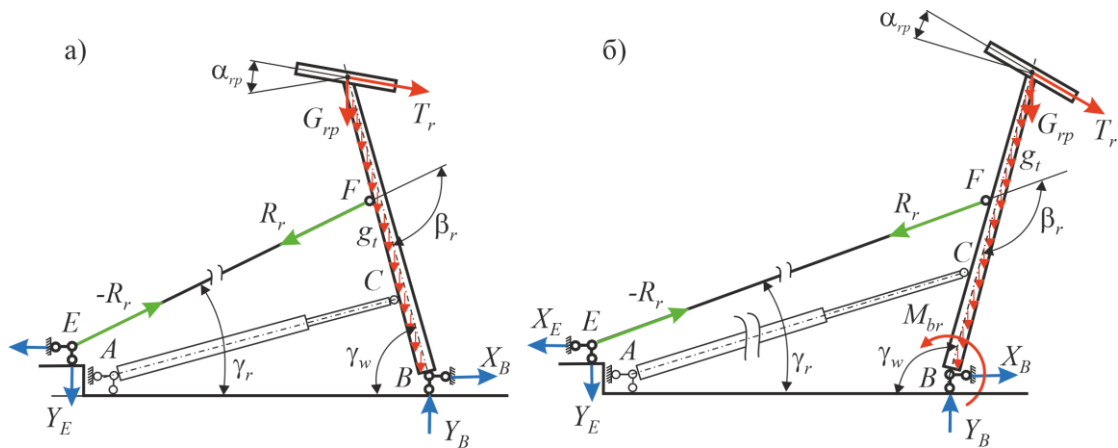


Рис. 3. Расчетные схемы для силового расчета механизма канатной фиксации концевой опоры с помощью одноветвевго каната: а – при  $\gamma_w \le 90^\circ$ ; б - при  $\gamma_w > 90^\circ$

ный угол наклона концевой опоры в рабочем положении;  $\gamma_{br}$  - угол наклона концевой опоры, при достижении которого начинает действовать тормозной момент  $M_{br}$ ;  $\beta_r$  - угол между продольными осями удерживающего каната и концевой опоры в рабочем положении, определяемый по зависимостям:

$$\begin{aligned}
 & - \text{при } l_{be} - l_{Bf} \cos \gamma_w - l_{Ff} \sin \gamma_w \leq 0 \\
 & \quad \beta_r = \pi + \gamma_w + \gamma_r = \pi + \gamma_w + \\
 & \quad + \arctg \left( \frac{l_{Bb} - l_{Ee} + l_{Bf} \sin \gamma_w - l_{Ff} \cos \gamma_w}{l_{be} - l_{Bf} \cos \gamma_w - l_{Ff} \sin \gamma_w} \right); \\
 & - \text{при } l_{be} - l_{Bf} \cos \gamma_w - l_{Ff} \sin \gamma_w > 0 \\
 & \quad \beta_r = \gamma_w + \gamma_r = \gamma_w + \\
 & \quad + \arctg \left( \frac{l_{Bb} - l_{Ee} + l_{Bf} \sin \gamma_w - l_{Ff} \cos \gamma_w}{l_{be} - l_{Bf} \cos \gamma_w - l_{Ff} \sin \gamma_w} \right),
 \end{aligned}$$

где  $l_{Bb}$ ,  $l_{Ee}$ ,  $l_{be}$  - расстояния между точками В и b, E и e, b и e.

Необходимость включения в состав технологического оборудования мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса внешнего тормозного устройства связана с явлением самопрокидывания концевой опоры при ее повороте в пределах  $\pi/2 \leq \gamma_w \leq \gamma_{w,max}$  [19, 20]. Для безопасности работы гидравлического механизма установки концевой опоры в рабочее положение с помощью подъемного гидроцилиндра тормозной момент  $M_{br}$  должен начинать действовать при угле наклона  $\gamma_w = \gamma_{br} < \pi/2$ , на-

пример, начиная с  $\gamma_{br} \sim 75...80^\circ$ . Минимально необходимое значение тормозного момента  $[M_{br}]$  может быть определено из условия, что на интервале  $\gamma_w > \pi/2$  усилие на штоке, преодолеваемое подъемным гидроцилиндром, составляет

$$n_{hc} R_{hc} (\pi/2 < \gamma_w \leq \gamma_{w,max}) > 0,$$

где  $n_{hc}$  - число подъемных гидроцилиндров механизма установки концевой опоры в рабочее положение;  $R_{hc}$  - усилие на штоке подъемного гидроцилиндра.

Так как максимальный момент опрокидывания концевой опоры, формируемый действием весовых нагрузок  $G_{rp}$  и  $g_t$ , наблюдается при  $\gamma_w = \gamma_{w,max}$ , то минимальный тормозной момент  $[M_{br}]$  определяется как:

$$[M_{br}] = |k_{br} (G_{rp} + 0,5g_t H_t) H_t \cos \gamma_{w,max}|,$$

где  $k_{br}$  - коэффициент запаса торможения, который может приниматься по рекомендациям для стреловых подъемных сооружений и грузовых канатных дорог  $k_{br} = 1,25$  [21, 22].

Так как в общем случае тормозной момент  $M_{br}(\gamma_w)$  может являться функцией угла поворота  $\gamma_w$ , то минимальное значение момента  $M_{br}(\gamma_w)$  на всем интервале углов поворота  $\gamma_{br} \leq \gamma_w \leq \gamma_{w,max}$  должно удовлетворять условию

$$M_{br}(\gamma_w) \geq [M_{br}].$$

Несмотря на то, что включение в состав технологического оборудования мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса внешнего тормозного устройства целесообразно с точки зрения повышения безопасности проведения монтажных работ во время перевода концевой опоры из исходного транспортного положения в конечное рабочее положение, тем не менее это не является обязательным, так как использова-

ние при подъеме концевой опоры канатной лебедки параллельно работе подъемного гидроцилиндра позволяет удерживать опору от самопрокидывания при больших значениях угла  $\gamma_w$ .

Опорные реакции в местах шарнирного крепления к несущей раме концевой опоры и удерживающего одноответвеного каната (рис. 2) составляют:

$$Y_B = -T_r \cos(\gamma_w + \alpha_{rp}) + G_{rp} + g_t H_t + R_r \left| \sin \left[ \arctg \left( \frac{l_{Bb} - l_{Ee} + l_{Bf} \sin \gamma_w - l_{Ff} \cos \gamma_w}{l_{be} - l_{Bf} \cos \gamma_w - l_{Ff} \sin \gamma_w} \right) \right] \right|;$$

$$X_B = R_r \cos \left[ \arctg \left( \frac{l_{Bb} - l_{Ee} + l_{Bf} \sin \gamma_w - l_{Ff} \cos \gamma_w}{l_{be} - l_{Bf} \cos \gamma_w - l_{Ff} \sin \gamma_w} \right) \right] - T_r \sin(\gamma_w + \alpha_{rp});$$

$$Y_E = -R_r \left| \sin \left[ \arctg \left( \frac{l_{Bb} - l_{Ee} + l_{Bf} \sin \gamma_w - l_{Ff} \cos \gamma_w}{l_{be} - l_{Bf} \cos \gamma_w - l_{Ff} \sin \gamma_w} \right) \right] \right|;$$

- при  $l_{be} - l_{Bf} \cos \gamma_w - l_{Ff} \sin \gamma_w \geq 0$

$$X_E = -R_r \cos \left[ \arctg \left( \frac{l_{Bb} - l_{Ee} + l_{Bf} \sin \gamma_w - l_{Ff} \cos \gamma_w}{l_{be} - l_{Bf} \cos \gamma_w - l_{Ff} \sin \gamma_w} \right) \right],$$

- при  $l_{be} - l_{Bf} \cos \gamma_w - l_{Ff} \sin \gamma_w < 0$

$$X_E = R_r \cos \left[ \arctg \left( \frac{l_{Bb} - l_{Ee} + l_{Bf} \sin \gamma_w - l_{Ff} \cos \gamma_w}{l_{be} - l_{Bf} \cos \gamma_w - l_{Ff} \sin \gamma_w} \right) \right].$$

### 3. Компьютерная реализация

Разработанная в разделе 2 математическая модель, предназначенная для силового расчета и анализа механизма канатной фиксации концевой опоры мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса была реализована как часть алгоритмического обеспечения компьютерной программы «Компоновка и силовой анализ технологического оборудования мобильного канатного комплекса» [23]. Она включает головную процедуру *Design\_of\_Mechanism\_for\_Instal ling\_and\_Fixing\_of\_End\_Tower\_of\_Mobile\_Ropeway* и 24 процедуры типа Procedure. Данная программа носит универсальный характер, так как позволяет выполнить компоновку и силовой анализ основного технологического оборудования для мобильных транспортно-перегрузочных канатных ком-

плексов всех известных в настоящее время вариантов их конструктивного исполнения [15]. Применительно к решению рассматриваемой в данной статье задаче силового расчета механизма канатной фиксации в указанной программе были использованы следующие процедуры:

- *DetRopeFixK* – силовой расчет механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении для режима работы II при канатной фиксации опоры для варианта исполнения K;

- *DiameterRope* – вычисление диаметра удерживающего каната;

- *MiniMax* – определение минимального и максимального значения силового фактора в пределах заданного интервала изменения угла  $\gamma_w$ ;

• *MiniMaxForce* – определение минимального и максимального значения силового фактора, а также угловых координат расположения этих значений в пределах заданного интервала изменения угла  $\gamma_w$ .

Результатом выполнения компьютерной программы применительно к решению рассматриваемой является расчет для концевой опоры заданной длины  $H_t$  следующих данных:

1) минимального значения тормозного момента  $[M_{br}]$  для устранения явления самопрокидывания концевой опоры при ее установке в рабочее положение;

2) максимального значения продольного осевого усилия  $R_r$  и диаметра одноветвевое  $d_{cr}$  и двухветвевое  $d_{cr(2)}$  удерживающего каната, необходимых для канатной фиксации концевой опоры в рабочем положении;

3) максимальных и минимальных значений опорных реакций  $X_B$ ,  $Y_B$ ,  $X_E$ , и  $Y_E$  при канатной фиксации концевой опоры в рабочем положении;

4) графиков изменения в пределах интервала углов  $\gamma_w \leq \gamma_{wmax}$ , соответствующих интервалу углов рабочего положения концевой опоры, таких параметров, как продольное осевое усилие в удерживающем канате  $R_r(\gamma_w)$ , опорные реакции  $X_B(\gamma_w)$ ,  $Y_B(\gamma_w)$ ,  $X_E(\gamma_w)$  и  $Y_E(\gamma_w)$ , плечо действия усилия в удерживающем канате  $h_r(\gamma_w)$ , угла наклона удерживающего каната  $\gamma_r(\gamma_w)$ , угла между продольными осями удерживающего каната и концевой опоры  $\beta_r(\gamma_w)$ .

#### 4. Обсуждение результатов

На рис. 4 показаны характерные графики изменения нормированного значения продольного осевого усилия  $\bar{R}_r = R_r/T_r$ , действующего в удерживающем одноветвевом канате в зависимости от угла наклона концевой опоры при работе мобильного канатного комплекса  $\gamma_w$  и угла  $\alpha_{rp}$  при высоте опоры  $H_t = 10$  м, расстояния присоединения удерживающего каната  $l_{Bf}/H_t$  и соотношении

нагрузок  $k_T = (G_{rp} + 0,5g_i H_t)/T_r = 0,05$ . При использовании двухветвевое каната количественные значения усилия  $\bar{R}_r$  необходимо уменьшить в 2 раза для всех значений угла  $\gamma_w$ .

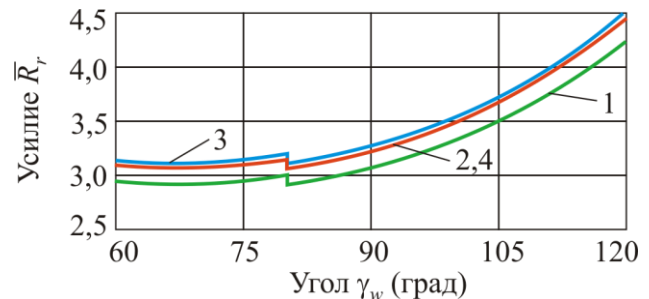


Рис. 4. Изменение нормированного усилия  $\bar{R}_r$  в одноветвевом канате в зависимости от угла наклона концевой опоры  $\gamma_w$  (1 -  $\alpha_{rp} = 20^\circ$ ; 2 -  $\alpha_{rp} = 10^\circ$ ; 3 -  $\alpha_{rp} = 0^\circ$ ; 4 -  $\alpha_{rp} = -10^\circ$ )

Анализ рис. 4 показывает, что величина усилия натяжения удерживающего каната  $R_r$  заметно зависит от положения концевой опоры при работе мобильной канатной дороги (т.е. от угла  $\gamma_w$ ). Наиболее благоприятны условия эксплуатации при  $\gamma_w < 90^\circ$ , причем в достаточно широком интервале  $60^\circ < \gamma_w < 90^\circ$  осевое усилие натяжения каната  $R_r$  практически неизменно, хотя и наблюдается его слабо выраженный минимум при  $\gamma_w \approx 68...70^\circ$ . Однако при  $\gamma_w > 90^\circ$  наблюдается интенсивный рост величины  $R_r$ , причем с приближением к значению угла наклона  $\gamma_w \rightarrow 120^\circ$  требуемое усилие натяжения удерживающего каната возрастает более чем в 1,5 раза по сравнению с возможным минимальным значением  $R_r$ .

Также видно, что усилие натяжения удерживающего каната  $R_r$  зависит от угла наклона плоскости канатного шкива к продольной оси концевой опоры  $\alpha_{rp}$ . Независимо от положения концевой опоры (т.е. угла  $\gamma_w$ ) наибольшее усилие натяжения каната соответствует перпендикулярной ориентации плоскости канатного шкива относительно продольной оси концевой опоры (т.е.  $\alpha_{rp} = 0$ ), а с отклонением значения  $\alpha_{rp}$  от 0



величина  $R_r$  ускоренно снижается, причем равные значения отклонения угла  $\alpha_{rp}$  в любую сторону от 0 приводят к равному результату. Учитывая приведенное в [16] математическое выражение для геометрической линии провисания несущего каната по II форме в виде параболической зависимости

$$y_r(x) = y_A + x \left[ \operatorname{tg} \alpha_{sl} - \frac{\psi_d q_{Rcr} (L_{rp} - x)}{2S_k} \right],$$

максимальное значение усилия натяжения удерживающего каната  $R_{r,\max}$  будет наблюдаться в том случае, когда в процессе эксплуатации мобильной канатной дороги будет выполняться следующее условие:

$$\operatorname{tg} \alpha_{sl} - \frac{\psi_d q_{Rcr} L_{rp}}{2S_k} = 0,$$

где  $y_A$  - высотная отметка расположения центра канатного шкива;  $x$  - продольная координата;  $\alpha_{sl}$  - угол наклона прямой линии соединяющей центры канатных шкивов сопряженных мобильных канатных комплексов;  $\psi_d$  - коэффициент динамичности [24];  $q_{Rcr}$  - распределенная нагрузка на несущий канат от веса самого каната, транспортируемого груза и ветрового воздействия [16, 24];  $L_{rp}$  - пролет мобильной канатной дороги;  $S_k$  - горизонтальное усилие натяжения несущего каната [25].

Величина  $R_{r,\max}$  является функцией угла наклона концевой опоры в рабочем положении, т.е.  $R_{r,\max} = R_{r,\max}(\gamma_w)$ , вследствие чего определение диаметра удерживающего каната  $d_{cr}$  выбранного типа подбирается, исходя из условия, что его разрывное усилие (агрегатная прочность)  $[R_{bf}]$  удовлетворяет соотношению:

$$[R_{bf}](d_{cr}) \geq R_{r,\max}(\gamma_w)[n_{cr}],$$

где  $[n_{cr}]$  - коэффициент запаса прочности несущего каната (ориентируясь на рекомендации Ростехнадзора России для грузоподъемных кранов [26] применительно к неподвижным канатам при регулярной с

перерывами работы кранов, можно принимать  $[n_{cr}] = 4,0$  или  $4,5$ ).

На рис. 5 показаны графики изменения нормированных значений опорных реакций в местах шарнирного крепления к несущей раме концевой опоры и удерживающего одновиткового каната

$$\bar{X}_B = \frac{X_B}{T_r}; \quad \bar{Y}_B = \frac{Y_B}{T_r}; \quad \bar{X}_E = \frac{X_E}{T_r}; \\ \bar{Y}_E = \frac{Y_E}{T_r}; \quad \bar{Y}_D = \frac{Y_D}{T_r}$$

в зависимости от угла наклона концевой опоры  $\gamma_w$  и угла  $\alpha_{rp}$  при высоте концевой опоры  $H_t = 10$  м, соотношении нагрузок  $k_T = 0,05$  и расстояния присоединения удерживающего каната  $l_{Bf} / H_t = 0,9$ .

Анализ рис. 5 показывает, что характер изменения опорных реакций с ростом угла установки концевой опоры  $\gamma_w$  качественно соответствует характеру изменения усилия натяжения удерживающего каната, т.е. с ростом  $\gamma_w$  наблюдается рост как горизонтальных, так и вертикальных реакций в опорных шарнирах  $B$  и  $E$ . Однако имеется и отличие: горизонтальные опорные реакции  $\bar{X}_B$  и  $\bar{X}_E$  практически не испытывают влияния угла наклона плоскости канатного шкива к продольной оси концевой опоры  $\alpha_{rp}$ .

## 5. Заключение

Использование в конструкции основного технологического оборудования мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса механизма канатной фиксации концевой опоры в рабочем положении имеет ряд преимуществ перед другими вариантами [1] фиксации концевой опоры. В частности, в их числе:

- разделение двух основных функций - установки концевой опоры в рабочее положение и фиксации концевой опоры при эксплуатации;

- пониженный диаметр и мощность подъемного гидроцилиндра, объем рабочей жидкости для гидросистемы механизма установки концевой опоры в рабочее положение;

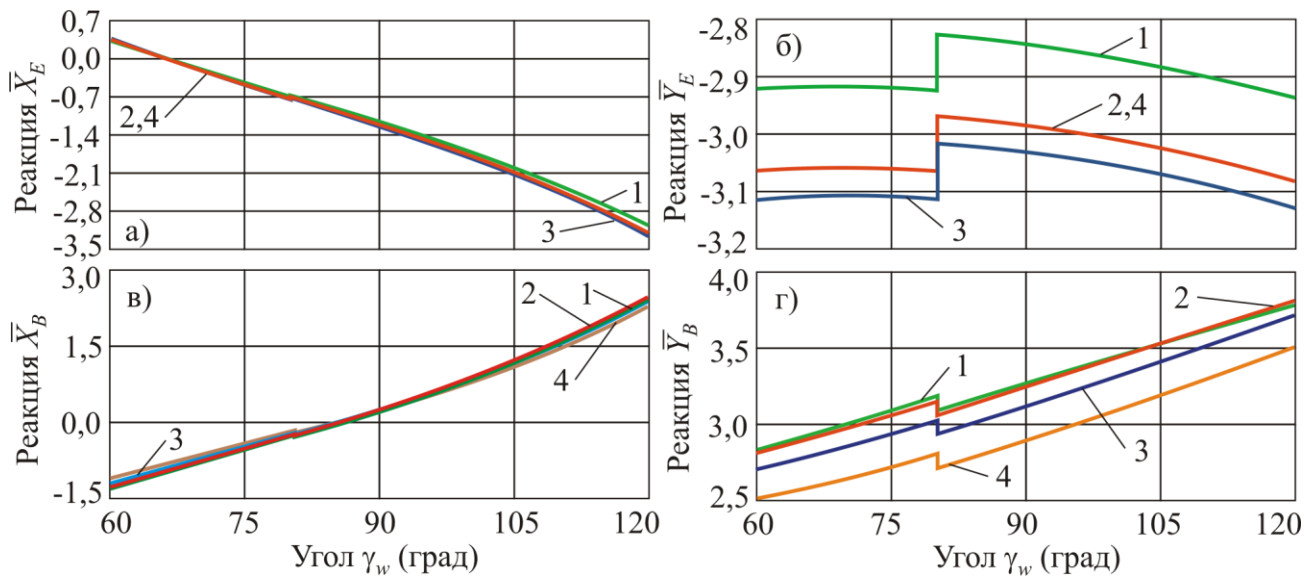


Рис. 5. Изменение нормированных опорных реакций в зависимости от угла наклона концевой опоры  $\gamma_w$ : а – реакция  $\bar{X}_E$ ; б – реакция  $\bar{Y}_E$ ; в – реакция  $\bar{X}_B$ ; г – реакция  $\bar{Y}_B$ ;  
 (1 -  $\alpha_{rp} = 20^\circ$ ; 2 -  $\alpha_{rp} = 10^\circ$ ; 3 -  $\alpha_{rp} = 0^\circ$ ; 4 -  $\alpha_{rp} = -10^\circ$ )

- возможность использования канатной лебедки в качестве удобного средства предварительного натяжения несущего каната;

- возможность регулировки угла наклона концевой опоры в рабочем положении в широких пределах;

- возможность отказа от использования дополнительных внешних тормозных устройств против самопрокидывания концевой опоры при ее установке в рабочее положение;

- дешевизна и простота замены удерживающего каната при техническом обслуживании и ремонте основного технологического оборудования мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса механизма.

В качестве наиболее серьезного и опасного по своим последствиям недостатка канатной фиксации следует отметить потенциаль-

но возможный обрыв удерживающего каната, приводящий к аварийному отказу мобильной канатной дороги и возможному разрушению самого мобильного канатного комплекса вследствие мгновенного приложения к нему весьма значительной инерционной нагрузки.

При канатной фиксации концевой опоры во время работы мобильной канатной дороги продольное усилие растяжения в удерживающем канате для варианта конструктивного исполнения мобильного канатного комплекса с концевым расположением концевой опоры канатной системы с опиранием на несущую раму самоходного колесного шасси оказывается в  $\sim 3$  раза меньше усилия, которое необходимо создавать подъемным гидrocилиндром при гидравлической фиксации концевой опоры.

### Список литературы

1. Vuchic V.R. Urban Transit Systems and Technology. NY: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 614 p.

2. Короткий А.А., Лагерев А.В., Месхи Б.Ч., Лагерев И.А., Панфилов А.В., Таричко В.И. Транспортно-логистические технологии и машины для цифровой урбанизированной среды. Ростов-на-Дону: ДГТУ,

### References

1. Vuchic V.R. Urban Transit Systems and Technology. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2007. 614 p.

2. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V., Tarichko V.I. *Transportno-logisticheskie tekhnologii i mashiny dlya tsifrovoy urbanizirovannoy sredy* [Transport and logistics technologies and ma-

2019. 268 с. DOI: 10.5281/zenodo.3551132

3. El-JouZou H. A Comparative Study of Aerial Ropeway Transit (ART) Systems. Advantages and Possibilities // Master of Science in Urban Agglomerations Thesis, Frankfurt University of Applied Sciences. 2016. 210 p.

4. Reichenbach M., Puhe M. Struggling with inertia: Regime barriers opposing planning and implementation of urban ropeways // *J. of Urban Mobility*. 2022. № 2. P. 100023.

5. Duglio S. Environmental Management and Sustainable Labels in the Ski Industry: A Critical Review // *Sustainability*. 2016. №8. P. 851.

6. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Перспективы внедрения инновационной технологии надземных пассажирских перевозок на основе подвесных пассажирских канатных дорог для модернизации системы общественного транспорта города Брянска, // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2017. №2. С. 163-177. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-02-163-177

7. Panfilov A.V., Korotkiy A.A., Panfilova E.A., Lagerev I.A. Development of transport infrastructure of urban mobility based on cable metro technology // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 786. P. 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012067

8. Fistola R. The City from the Wire the Aerial Cable Transport for the Urban Mobility // *Journal of Land Use, Mobility and Environment*. 2020. №3. P. 59-65.

9. Wagner H., Lenz S., Stratmann S., Beha R. Seilbahnen als innovatives Beförderungsmittel im urbanen Bereich // *Mobilität 4.0 – neue Geschäftsmodelle für Produkt- und Dienstleistungsinnovationen. Schwerpunkt Business Model Innovation*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2018. P. 73-96.

10. Степченко Т.А., Бабич О.В. Результаты научных исследований Брянского государственного университета в сфере мобильных транспортно-перегрузочных канатных систем и комплексов // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2021. №1. С. 9-29. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-09-29

chines for the digital urban environment]. Rostov-on-Don, Don State Technical University, 2019. 268 p. DOI: 10.5281/zenodo.3551132 (In Russian)

3. El-JouZou H. A Comparative Study of Aerial Ropeway Transit (ART) Systems. Advantages and Possibilities. Master of Science in Urban Agglomerations Thesis, Frankfurt University of Applied Sciences. 2016. 210 p.

4. Reichenbach M., Puhe M. Struggling with inertia: Regime barriers opposing planning and implementation of urban ropeways. *J. of Urban Mobility*, 2022, No. 2, pp. 100023.

5. Duglio S. Environmental Management and Sustainable Labels in the Ski Industry: A Critical Review. *Sustainability*, 2016, No.8, pp. 851.

6. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Prospects of introduction of innovative technology overhead passenger traffic on the basis of the passenger ropeways for the modernization of the public transport system of the Bryansk city. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.2, pp. 163-177. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-02-163-177. (In Russian)

7. Panfilov A.V., Korotkiy A.A., Panfilova E.A., Lagerev I.A. Development of transport infrastructure of urban mobility based on cable metro technology. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 786, pp. 012067. DOI: 10.1088/1757-899X/786/1/012067

8. Fistola R. The City from the Wire the Aerial Cable Transport for the Urban Mobility. *Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 2020, No.3, pp. 59-65.

9. Wagner H., Lenz S., Stratmann S., Beha R. Seilbahnen als innovatives Beförderungsmittel im urbanen Bereich. In: *Mobilität 4.0 – neue Geschäftsmodelle für Produkt- und Dienstleistungsinnovationen. Schwerpunkt Business Model Innovation*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2018. Pp. 73-96.

10. Stepchenko T.A., Babich O.V. Results of scientific research of Bryansk State University in the sphere of mobile transportation and handling rope systems and ropeways. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.1,

11. Дукельский А.И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны. Москва-Ленинград: Машиностроение, 1966. 484 с.
12. Pestal E. Seilbahnen und Seilkrane in Holz und Materialtransport. Wien: Fromme, 1961. 410 p.
13. Booth W.G. The Design and Application of Aerial Ropeways: Master of Engineering Thesis. – Hamilton: McMaster University, 1965. 248 p.
14. Степченко Т.А., Бабич О.В. Результаты научных исследований Брянского государственного университета в 2019 году в сфере транспортно-логистических технологий и машин для урбанизированной среды // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №1. С. 120-135. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-120-135
15. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Таричко В.И. Конструкции и основы проектирования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2020. 207 с.
16. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Таричко В.И. Надежность и безопасность эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2022. 207 с.
17. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Общий подход к созданию цифровых двойников мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №1. С. 38-60. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-38-60
18. Пат. 204003 Рос. Федерация: МПК В61D 7/00; В61D 7/06; В66С 23/16. Самоходная концевая станция мобильной канатной дороги / Лагереv А.В., Лагереv И.А., Таричко В.И.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «БГУ им. ак. И.Г. Петровского». – № 2020140506; заявл. 08.12.2020; опубл. 04.05.2021, Бюл. № 13.
19. Лагереv И.А., Таричко В.И., Лагереv А.В. Компоновка технологического оборудования на базовом шасси мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского
- pp. 9-29. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-09-29. (In Russian)
11. Dukelskiy A.I. *Podvesnye kanatnye dorogi i kabelnye kраны* [Overhead cableways and cable cranes]. Moscow-Leningrad, Mashinostroenie, 1966. 484 p. (In Russian)
12. Pestal E. Seilbahnen und Seilkrane in Holz und Materialtransport. Wien: Fromme, 1961. 410 p.
13. Booth W.G. The Design and Application of Aerial Ropeways: Master of Engineering Thesis. Hamilton, McMaster University, 1965. 248 p.
14. Stepchenko T.A., Babich O.V. The results of scientific research of the Bryansk State University in 2019 in the field of transport and logistics technologies and machines for the urban environment. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.1, pp. 120-135. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-120-135. (In Russian)
15. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Konstruktsii i osnovy proektirovaniya mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Structures and design fundamentals of mobile transporting and overloading rope facilities]. Bryansk, RISO BGU, 2020. 207 p. (In Russian)
16. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Nadezhnost i bezopasnost ekspluatatsii mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Reliability and safety of operation of mobile transport and overloading rope complexes]. Bryansk, RISO BGU, 2022. 207 p. (In Russian)
17. Lagerev A.V., Lagerev I.A. A general approach to the creation of digital twins of mobile ropeways based on mobile transport and reloading rope units. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.1, pp. 38-60. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-38-60 (In Russian)
18. Patent RU 204003, B61B 7/00, B61B 7/06, B66C 23/16. *Samokhodnaya kontseвая stantsiya mobilnoy kanatnoy dorogi* [Self-propelled terminal station of the mobile ropeway]. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Declared 08.12.2020. Published

государственного университета. 2020. №3. С. 388-403. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-388-403.

20. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Kinematic and Force Analysis of the End Tower Positioning Mechanism at Mobile Ropeway // В сб.: Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE: International Conference on Industrial Engineering. Челябинск, 2022. С. 394-404. DOI:10.1007/978-3-030-85230-6\_46

21. Правила безопасности грузовых подвесных канатных дорог: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 22.11.2013 № 563. М.: Стандартинформ, 2014. 35 с.

22. Подъемно-транспортная техника: словарь-справочник: в 2-х т. Т.1 / Под ред. К.Д. Никитина, Л.Н. Горбунова. Красноярск: Сиб. федер. ун-т; Политехн. ин-т. 2007. 578 с.

23. Компоновка и силовой анализ технологического оборудования мобильного канатного комплекса: свид-во о регистрации программы для ЭВМ / Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv И.А., Перминова Д.И.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г.Петровского» – № 2021614929; заявл. 23.03.21; опубл. 31.03.21.

24. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Design of Passenger Aerial Ropeway for Urban Environment // Urban Rail Transit. 2019. Vol.5. №1. P. 17-28. DOI: 10.1007/s40864-018-0099-z

25. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Шнейдерович Р.М. Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1966. 616 с.

26. Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения: Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности: утв. приказом Ростехнадзора от 12.11.2013 № 533. М.: Стандартинформ, 2014.

04.05.2021. (In Russian)

19. 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)

20. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. (2022) Kinematic and Force Analysis of the End Tower Positioning Mechanism at Mobile Ropeway. In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds) Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE 2021. pp. 394-404 Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-85230-6\_46

21. *Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti "Pravila bezopasnosti passazhirskikh kanatnykh dorog i funikulerov"* [Federal norms and rules in the field of industrial safety "Safety rules for passenger ropeways and funiculars"]. Moscow, Federalnaya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru, 2014. (In Russian)

22. *Podemno-transportnaya tekhnika: slovar-spravochnik: v 2-kh t. T.1* [Hoisting-and-transport equipment: dictionary-reference book, in 2 vol. Vol. 1]. Eds. Nikitin K.D., Gorbunov L.N. Krasnoyarsk, Sibirskiy federalnyy universitet, Politekhnikeskiiy institut, 2007. 578 p. (In Russian)

23. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A., Perminova D.I. *Komponovka i silovoy analiz tekhnologicheskogo oborudovaniya mobilnogo kanatnogo kompleksa. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [Layout and force analysis of the technological equipment of the mobile rope complex. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2021614929, 2021. (In Russian)

24. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Design of Passenger Aerial Ropeway for Urban Environment. *Urban Rail Transit*, 2019, Vol.5, No.1, pp. 17-28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40864-018-0099-z>.

25. Birger I.A., Shorr B.F., Shneyderovich

† R.M. *Raschet na prochnost detaley mashin*  
† [Strength calculation of machine parts]. Mos-  
† cow, Mashinostroenie, 1966. 616 p. (In Rus-  
† sian)

† 26. *Federalnye normy i pravila v oblasti*  
† *promyshlennoy bezopasnosti "Pravila*  
† *bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh*  
† *obektov, na kotorykh ispolzuyutsya podemnye*  
† *sooruzheniya"* [Federal norms and rules in the  
† field of industrial safety "Safety rules for hazard-  
† ous production facilities where lifting facilities  
† are used"]. Moscow, Federalnaya sluzhba po  
† ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i  
† atomnomu nadzoru, 2014. (In Russian)