

УДК (UDC) 608.4

РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БРЯНСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА В 2022 ГОДУ В СФЕРЕ  
СОЗДАНИЯ МОБИЛЬНЫХ КАНАТНЫХ ДОРОГ И ЛЕСНЫХ  
КАНАТНЫХ МАШИН НА БАЗЕ САМОХОДНЫХ КОЛЕСНЫХ ШАССИTHE RESULTS OF BRYANSK STATE UNIVERSITY SCIENTIFIC RESEARCH  
IN 2022 IN THE FIELD OF CREATION OF MOBILE ROPEWAYS AND  
FOREST ROPE UNITS BASED ON SELF-PROPELLED WHEELED CHASSISСтепченко Т.А., Бабич О.В.  
Stepchenko T.A., Babich O.V.Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)  
Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** Представлены результаты научно-исследовательской деятельности ученых Брянского государственного университета имени академика И.Г. Петровского в области разработки перспективных отечественных образцов конструкций мобильных подвесных канатных систем различного функционального назначения - мобильных канатных дорог на базе самоходных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости, аэромобильных канатных дорог на базе перемещаемых авиационным транспортом канатных установок контейнерного и рамного конструктивного исполнения, лесных канатных машин для проведения лесозаготовительных работ на склонах. Дано описание разработанных математических моделей и методов моделирования рабочих процессов при эксплуатации указанного канатного оборудования, включая создание цифровых двойников, тяговый расчет, анализ динамических процессов, планирование технического обслуживания и др.

**Ключевые слова:** мобильная канатная дорога, аэромобильная канатная дорога, мобильный канатный комплекс, лесная канатная дорога, конструкция, проектирование, моделирование.

**Дата принятия к публикации:** 01.03.2023

**Дата публикации:** 25.03.2023

**Сведения об авторах:**

**Степченко Татьяна Александровна** – доктор педагогических наук, профессор, проректор по научной работе и международным связям ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»,  
e-mail: ta-step2007@yandex.ru.

**Бабич Оксана Викторовна** – доктор экономических наук, доцент, директор НИИ фундаментальных и прикладных исследований ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»,  
e-mail: babichoksana221@mail.ru.

ORCID: 0000-0003-1954-1475

**Abstract.** The results of the research activity of scientists of the Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University in the field of developing promising domestic designs of mobile aerial rope systems of various functional purposes - mobile ropeways based on self-propelled wheeled chassis of high load capacity and cross-country ability, airmobile cable cars based on container and frame rope installations transported by air transport, forest rope units for logging. The description of the developed mathematical models and methods of modeling work processes during the operation of the specified rope equipment, including the creation of digital twins, traction calculation, analysis of dynamic processes, maintenance planning, etc. is given.

**Keywords:** mobile ropeway, airmobile ropeway, mobile rope complex, forest rope unit, construction, design, modeling.

**Date of acceptance for publication:** 01.03.2023

**Date of publication:** 25.03.2023

**Authors' information:**

**Tatyana A. Stepchenko** - Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Vice rector for research and international relations, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, e-mail: ta-step2007@yandex.ru.

**Oksana V. Babich** - Doctor of Economical Sciences, Assistant Professor, Director of Research Institute of Fundamental and Applied Research, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,  
e-mail: babichoksana221@mail.ru.

ORCID: 0000-0003-1954-1475

## 1. Введение

В 2022 году учеными Брянского государственного университета имени академика И.Г. Петровского были продолжены многолетние научные исследования в приоритетном направлении – в области разработки перспективных отечественных образцов конструкций мобильных канатных дорог, формируемых двумя сопряженными единой несущо-тяговой канатной системой мобильными транспортно-перегрузочными канатными комплексами на базе автономных самоходных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости. Описание и анализ ранее полученных фундаментальных и прикладных результатов этого научного направления представлены в [1 - 4]. Указанные исследования проводились в рамках проекта № 22-29-00798 «Создание научных основ разработки цифровых двойников мобильных канатных транспортно-перегрузочных систем для работы в зонах чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера» Российского научного фонда.

Также в 2022 году были начаты перспективные исследования новых типов канатных систем:

- аэромобильных канатных дорог контейнерного и рамного конструктивного исполнения;
- лесных канатных машин для проведения лесозаготовительных работ на склонах.

Исследования лесозаготовительных канатных машин проводились в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук и докторов наук «Разработка научных основ моделирования рабочих процессов и оптимального проектирования роботизированных машин для лесозаготовки на склонах с использованием канатных систем для позиционирования рабочего органа и вывоза древесины».

Указанные исследования проводились в соответствии с планами развития научной деятельности университета [5] и научно-исследовательской лаборатории «Транспортно-логистические роботизированные

технологии и комплексы безопасной урбанизированной среды» [6].

Результаты выполненных в 2022 году исследований ученых БГУ имени академика И.Г. Петровского были обобщены в монографии [7], которая явилась логическим продолжением предыдущих монографий аналогичной тематики [8 - 11]. В монографии [7] рассмотрены вопросы построения математических моделей и инженерных методик тягового расчета и определения функциональных возможностей мобильных канатных дорог, прогнозирования кинетики надежности и формирования оптимальных стратегий планово-предупредительного ремонта. Для реализации задач компьютерного моделирования исследованных рабочих процессов были созданы и защищены как объекты интеллектуальной деятельности, правообладателем которых является БГУ имени академика И.Г. Петровского, вычислительные программы для ЭВМ [12 - 16]. Они позволяют обеспечить современный уровень автоматизации проектирования (включая оптимальное проектирование) и подготовки производства.

Исследования в области мобильных канатных дорог на базе самоходных колесных шасси, успешно проводимые в БГУ имени академика И.Г. Петровского, представляют интерес для отечественных и зарубежных ученых и специалистов производства. Это подтверждается публикацией результатов рассмотренных выше исследований в иностранных научных журналах, индексируемых в наукометрической базе Scopus [17, 18].

Далее более подробно рассмотрены публикации, содержащие обладающие научной новизной и практической значимостью результаты выполненных в 2022 году научных исследований, по основным направлениям деятельности в области мобильных канатных транспортных систем.

## 2. Исследования в области мобильных канатных дорог

Ключевым результатом годовых исследований в области мобильных канатных дорог явилось создание методологических подходов и разработанных на их основе математиче-

ских моделей, что позволило провести анализ полученных в результате конкретных расчетов количественных данных, которые в совокупности позволяют оценить потенциальные функциональные возможности однопролетных одноканатных мобильных канатных дорог маятникового типа на базе сопряженных самоходных шасси, а также выявить эффективные технико-технологические направления совершенствования известных конструкций мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов [10].

Теоретической базой для анализа функциональных возможностей и основных технических характеристик однопролетных одноканатных мобильных канатных дорог маятникового типа является тяговый расчет несущее-тяговой канатной системы с определением усилий натяжения стального каната в характерных точках по длине трассы канатной дороги, а также необходимого усилия предварительного натяжения каната и потребной мощности привода механизм перемещения каната с транспортируемым грузом. Тяговый расчет позволяет определить ту область множества возможных значений грузо-пространственных характеристик транспортных систем, в пределах которой целесообразно использовать мобильной канатной дороги рассматриваемой конструкции.

В [19] представлена методика, ориентированная на построение диаграмм натяжения несущее-тяговых канатов при стационарном и нестационарных режимах работы мобильной канатной дороги. Она ориентирована как на расчетную оценку нагруженности канатной системы на основе учета большого числа факторов, характеризующих эксплуатационные нагрузки, параметры рельефа местности и транспортируемого груза, так и на анализ направленности и значимости варьирования указанных факторов и основных конструктивных параметров основного технологического оборудования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Данная методика была реализована в программе для ЭВМ [13].

Хотя в основу алгоритма построения диаграммы натяжения несущее-тяговых канатов мобильной канатной дороги был положен

сходный алгоритм тягового расчета конвейеров с грузонесущим тяговым органом [20 - 22], тем не менее, применительно к канатной дороге он подвергся коррекции с учетом специфических особенностей конструкции и режима работы. В первую очередь это связано с необходимостью учета возможности реализации одинаковых или различных форм естественного провисания несущее-тягового каната для его различных ветвей, а также специфических источников сопротивления его движению. Указанный алгоритм предусматривает расчет усилий натяжения несущее-тяговых канатов в нескольких характерных расчетных точках путем обхода трассы мобильной канатной дороги по контуру по направлению движения каната. При этом выполняется суммирование сил сопротивления движению каната в пределах каждого характерного участка трассы между соседними последовательно расположенными расчетными точками.

В [19] было показано, что в наибольшей степени на натяжение несущее-тяговых канатов оказывают влияние количественные параметры, которые характеризуют:

- трассу мобильной канатной дороги (величина пролета между конечными точками, минимальный вертикальный габарит приближения транспортируемого груза к посторонним предметам, длина концевой опоры мобильного канатного комплекса);

- профиль поверхности в месте расположения мобильной канатной дороги (угол наклона к горизонтальной плоскости прямой, проходящей через центры канатных шкивов сопряженных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов);

- транспортируемый груз (вес, вертикальный и горизонтальный габарит, расчетная площадь);

- ветровое воздействие на канатную систему и транспортируемый груз (нормативное значение ветрового давления, направление ветра относительно направлению перемещения груза).

Изменение указанных количественных параметров по-разному влияет на изменение усилий натяжения в несущее-тяговых канатах. Увеличение длины концевой опоры и

угол наклона канатной линии позволяет использовать меньшее натяжение канатной системы, так как увеличение указанных параметров допускает большее естественное провисание несущих канатов в пролете мобильной канатной дороги. Увеличение остальных параметров требует использования большего натяжения канатной системы для уменьшения стрелы естественного провисания канатов.

На основе рассмотренного в [19] тягового расчета в [7] были выявлены функциональные возможности и определены основные тактико-технические характеристики однопролетных одноканатных мобильных канатных дорог маятникового типа. Для проведения значительного числа вариантных расчетов была разработана компьютерная программа [25]. В результате было установлено, что для количественной оценки функциональных возможностей указанных канатных систем необходимо использовать грузопро пространственные характеристики, выраженные в трехмерном пространстве параметров «пролет дороги-угол наклона дороги-вес груза», причем из-за сложности графического отображения такого трехмерного пространства функциональные возможности мобильных канатных дорог предложено представлять набором двумерных сечений пространства параметров «пролет дороги-угол наклона дороги» для нескольких дискретных значений веса транспортируемого груза.

Согласно [7], форма, положение границ и количественные значения области возможного использования мобильной канатной дороги определяются взаимным сочетанием ряда технических характеристик как самой дороги, так и сопряженных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. В их число входят тяговый фактор приводного канатного шкива, допустимое поверхностное давление для материала футеровки профилированной поверхности приводного канатного шкива, длина концевой опоры, предельный расчетный изгибающий момент в корневом сечении концевой опоры, мощность привода механизма перемещения каната с транспортируемым грузом, диаметр приводного канатного шкива, допустимый вертикальный габарит приближения транспортируемого груза к посторонним предметам на опорной поверхности, а также диаметр, маркировочная группа и тип несущего каната. При этом доминирующую роль играют физико-механические характеристики материала футеровки профилированного ручья приводного канатного шкива (коэффициент трения и допустимое поверхностное давление), а также параметры схемы огибания несущим канатом приводного канатного шкива. Примером графического представления грузопро пространственных характеристик может служить рис. 1.

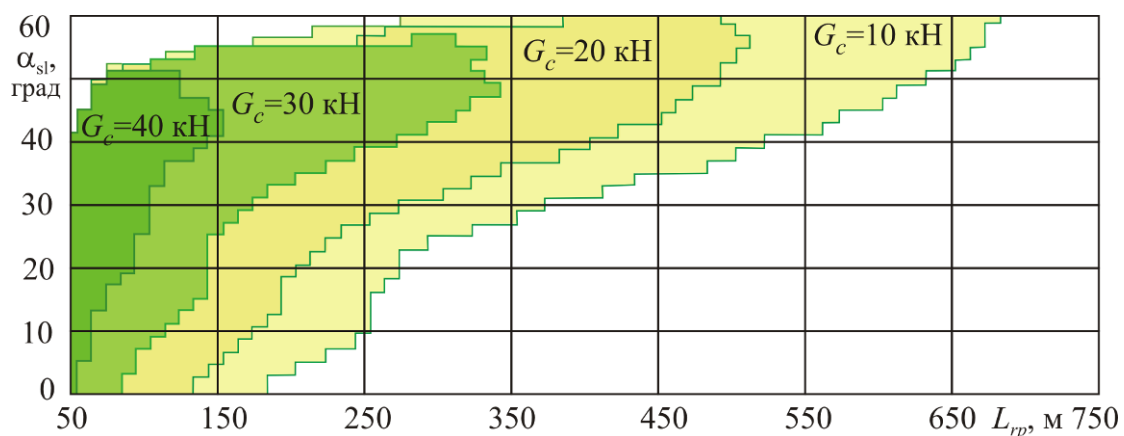


Рис. 1. Пример грузопро пространственных характеристик, определяющих области возможного использования конкретного варианта мобильной канатной дороги, для нескольких дискретных значений веса транспортируемого груза  $G_c$

В [23] рассмотрена методика оценки массовой производительности однопролетных мобильных канатных дорог на базе самоходных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Выявлено, что для мобильных канатных дорог эта техническая характеристика, которая для стационарных канатных дорог имеет первостепенное значение, не имеет существенного практического значения. Данное обстоятельство объясняется тем, что мобильные канатные дороги предназначены для выполнения специальных транспортных задач, не связанных с обслуживанием фиксированного технологического процесса, в течение ограниченного интервала времени эксплуатации на одном месте дислокации. Кроме того, она производительность определяется не столько временем перемещения транспортируемого груза как длительностью погрузочно-разгрузочных операций в конечных точках трассы мобильной канатной дороги. Таким образом, на этапе проектирования невозможно определить фактическую массовую производительность, так как она переменна и различается в каждом конкретном случае в весьма широких пределах, исходя из конкретных условий эксплуатации и их влияния на длительность погрузочно-разгрузочных операций.

Большая работа учеными БГУ имени академика И.Г. Петровского была проведена при решении научных задач, связанных с созданием цифровых двойников [24 - 26] и цифровых теней [26] мобильных канатных дорог. Сформированная на основе системного подхода концепция цифрового двойника однопролетных мобильных канатных дорог маятникового типа на базе самоходных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов в виде модульно-иерархической структуры была изначально представлена в [24], а затем развита в ряде последующих работ [25, 27, 28].

При построении цифрового двойника мобильной канатной дороги системный подход был использован как на стадии ее декомпозиции в качестве структурно и функционально сложного технического объекта с выявлением комплекса взаимосвязанных самостоятельных модулей (геометрических и

математических моделей конструктивных элементов и физических процессов) и с установлением причинно-следственных связей между этими модулями, так и на стадии агрегирования выявленных модулей в единую цифровую динамическую модель мобильной канатной дороги на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов [24, 25]. На рис. 2 показана структура разработанного цифрового двойника. Она имеет модульно-иерархическую структуру, формируемую информационными математическими моделями отдельных конструктивных элементов и физических процессов, расположенными на 5 иерархических уровнях.

Согласно [24], нижний I уровень формируют индивидуальные информационные математические модели конкретного конструктивного элемента и процесса (ИИММ). На II уровне эти модели подлежат агрегированию с учетом их принадлежности к одному из ключевых устройств основного технологического оборудования мобильного канатного комплекса, образуя групповые информационные математические модели (ГИММ). Уровень III формируют режимные информационные математические модели (РИММ) структурных компонентов, образованные путем агрегирования моделей ГИММ II уровня отдельно для приводной и натяжной станций и канатной системы с учетом их функционирования на различных режимах: рабочем (Pr), навешивания (Pn) и демонтажа (Pd) канатной системы, установки концевой опоры в рабочее положение (Pm) и транспортное положение (Pp), транспортировки к месту работы (Pt). Агрегирование моделей РИММ III уровня позволяет сформировать полные информационные математические модели (ПИММ) приводной и натяжной станций и канатной системы в целом. Уровень 0 формируют вспомогательные информационные математические модели (ВИММ), которые непосредственно не относятся к конструктивным элементам мобильных канатных дорог, однако необходимы для адекватного задания исходных данных для моделей I – IV уровней (например, модели ветрового и температурного воздействия, модель грунтового основания и др.).

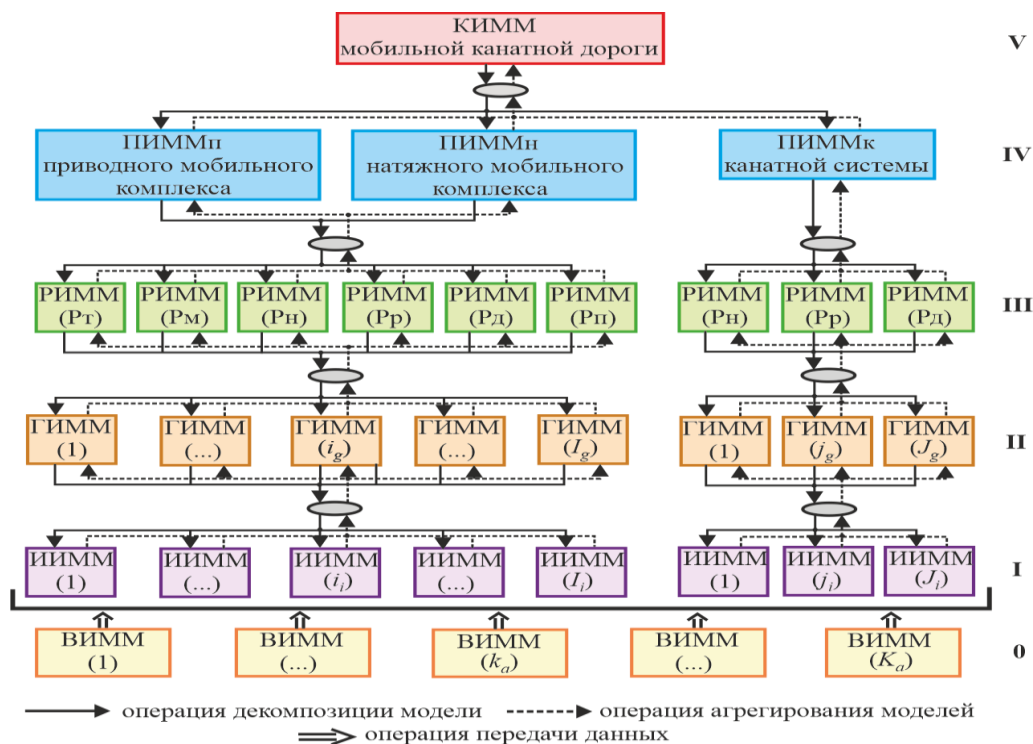


Рис. 2. Структура цифрового двойника мобильной канатной дороги [24]

Использованный при построении цифровых двойников мобильных канатных дорог системный подход, позволивший разработать их многоуровневую модульно-иерархическую структуру, является эффективным. При проектировании и моделировании канатных дорог он обеспечивает реализацию следующих возможностей [25]:

- при разработке новых цифровых двойников использовать уже существующие модули, выражающие индивидуальные или групповые информационные математические модели конструктивных элементов и физических процессов;

- модифицировать существующие цифровые двойники для мобильных канатных дорог иного конструктивного исполнения на основе единообразного методологического подхода;

- использовать существующие информационные математические модели для аналогичных конструктивных элементов и физических процессов.

В рамках исследований, направленных на методологическое и алгоритмическое наполнение цифрового двойника разработанной структуры в 2022 году был создан ряд математических моделей I и II уровней (рис. 2)

[27 - 29], включая гидродинамическую модель работы гидропривода механизма установки концевой опоры [29], кинематическую и силовую модели механизма установки концевой опоры [17] и др. Эти модели дополнили имеющийся уже задел математических моделей, разработанных в предыдущие годы [8, 11] и представленных ранее в [1 - 4].

В 2022 году в фокусе внимания ученых БГУ имени академика И.Г. Петровского продолжали оставаться вопросы безопасности и надежности эксплуатации мобильных канатных дорог. Важной технической задачей, направленной на повышение безопасности, является разработка конструкций и методов проектирования устройств, препятствующих потере общей устойчивости и опрокидыванию мобильных транспортно-технологических комплексов вследствие воздействия на концевые опоры значительных по величине эксплуатационных нагрузок от натяжения несущего каната, собственного веса каната и транспортируемого груза, а также ветровых нагрузок, в том числе, их динамической составляющей. Были разработаны новая конструкция устройство для автоматической установки аутригеров самоходного колесного шасси (патент 213723 RU [30]), а также мето-

дика его проектирования [31]. Указанная конструкция позволяет повысить удобство эксплуатации самоходного колесного шасси за счет снижения трудоемкости и ускорения операций по переводу выносных опор из транспортного положения в рабочее положение и обратно, упростить конструкцию и снизить массо-габаритные характеристики устройства вследствие уменьшения количества используемых гидродвигателей и обслуживающих их работу элементов гидропривода, а также уменьшить объем и трудоемкость технического обслуживания и ремонта.

Проблема прогнозирования надежности мобильных канатных дорог рассмотрена в [7, 18]. В этих работах представлен метод компьютерного моделирования протекания во времени процесса изменения показателей надежности мобильной канатной дороги маятникового типа, отдельной самоходной канатной установки и ее ключевых подсистем – гидравлической, механической (включая механизм движения несущего тягового каната) и информационно-управляющей. Метод базируется на разработанной вероятностной математической модели. Она позволяет прогнозировать кинетику показателей надежности технических объектов как в целом, так и их отдельных конструктивных элементов с учетом сроков и объемов проведения ремонтно-восстановительных работ, а также проводить имитационное моделирование эксплуатационной стадии жизненного цикла данных устройств. Расчет вероятностей нахождения технических объектов и их отдельных элементов в произвольный момент времени в работоспособном или исправном состоянии основан на решении системы линейных дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена, причем предусмотрено периодическое реформирование указанной системы уравнений в моменты времени проведения плановых ремонтов мобильного канатного комплекса.

На основе метода моделирования кинетики показателей надежности мобильной канатной дороги [18] были разработаны методологический подход и реализующий его метод формирования оптимальной стратегии плановых ремонтов мобильной канатной до-

роги на базе самоходных шасси [7, 32]. Метод ориентирован на планирование оптимальной стратегии планово-предупредительных ремонтов мобильных канатных дорог на этапе проектирования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Сроки выполнения ремонтов и перечень восстанавливаемых конструктивных элементов назначаются на основе двухкритериальной оптимизации, предусматривающей достижение минимума стоимости ремонтных затрат и максимума средней вероятности безотказной работы канатной дороги в течение всего срока службы оборудования. Метод реализован в компьютерной программе [12] и апробирован на примере конкретной мобильной канатной дороги, показаны его возможности. Как показано в [7], оптимальное планирование стратегии плановых ремонтов мобильной канатной дороги на стадии проектирования технологического оборудования самоходных транспортных установок и последующая реализация указанной стратегии на стадии их эксплуатации оказывается эффективным мероприятием как для снижения стоимости ремонтно-восстановительных работ, так и для обеспечения высоких характеристик надежности. Разработанный метод является универсальным, он может быть использован для разработки оптимальных стратегий плановых предупредительных ремонтов различных инженерных систем и машин, сложного технологического оборудования.

### 3. Исследования в области аэромобильных канатных дорог

В 2022 г. учеными БГУ имени академика И.Г. Петровского начат комплекс перспективных фундаментальных и прикладных исследований в области разработки эффективных конструкций, проектирования и моделирования рабочих процессов нового типа мобильных канатных дорог – аэромобильных канатных дорог контейнерного и рамного конструктивного исполнения.

Аэромобильная канатная дорога – это быстроразвертываемая подвесная грузопассажирская канатная дорога, формируемая

с помощью комплекта из двух сопряженных единой несущо-тяговой канатной системой концевых канатных установок, доставка которых осуществляется авиационным транспортом, в частности, вертолетами внутри грузового отсека или на внешней подвеске, а установка производится на не требующих трудоемкой предварительной подготовки площадках.

Аэромобильные канатные дороги имеют более гибкие функциональные возможности по сравнению с параллельно разрабатываемыми также учеными БГУ мобильными канатными дорогами, формируемыми двумя сопряженными единой несущо-тяговой канатной системой мобильными транспортно-перегрузочными канатными комплексами на базе автономных самоходных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости [10]. Это связано с более эффективным способом доставки необходимого технологического оборудования авиационным транспортом, вследствие чего скорость доставки оказывается минимальной из всех возможных логистических решений и не требуется наличие хотя бы минимально обустроенных дорог или колонных путей для колесной техники.

Аэромобильные канатные дороги могут использоваться во всех тех же природных условиях, что и мобильные канатные дороги на базе колесных шасси [7], а также дополнительно в условиях бездорожья – высокогорных районах, малоосвоенных территориях Арктики, Дальнего Востока, Камчатки, Курильских островов, для обеспечения погрузки/разгрузки морских судов на не обустроенных участках морского и речного побережья, проведения десантных операций и т.п. Также аэромобильные канатные дороги позволяют обеспечить:

- существенное снижение финансовых и материальных затрат, сокращение числа эксплуатационного персонала и повышение оперативности развертывания (монтажа и демонтажа) канатной дороги, существенное снижение издержек на эксплуатацию и техническое обслуживание канатной дороги во время ее работы;

- повышение надежности эксплуатации канатной дороги, в частности, повышение таких основных количественных характеристик, как коэффициенты готовности, использования, оперативной готовности и др.

Перспективная конструкция аэромобильной канатной дороги контейнерного конструктивного исполнения защищена патентом 2780877 RU [33]. На рис. 3 приведен общий вид указанной конструкции концевой канатной установки в транспортном и рабочем положениях.

Несущее основание концевой канатной установки выполнено из шести шарнирно соединенных между собой несущих пластин. В транспортном положении несущие пластины складываются, образуя таким образом стенки закрытого прямоугольного контейнера (рис. 3, а). В рабочем положении несущие пластины раскладываются, образуя плоскую горизонтальную площадку (рис. 3, б). Необходимое технологическое оборудование, включающее в том числе концевую опору изменяемой высоты, механизм перевода концевой опоры из транспортного положения в рабочее положение, механизм удержания концевой опоры в рабочем положении, устройства крепления несущего основания на грунте и грузоподъемное устройство, стационарно закреплено на несущих пластинах и не предусматривает дополнительной перестановки при развертывании аэромобильной канатной дороги.

В настоящее время Российская Федерация в лице ученых Брянского государственного университета имени академика И.Г. Петровского обладает мировым приоритетом в разработке указанного вида канатного транспорта.

#### 4. Исследования в области лесных канатных машин

Истощение запасов древесины на равнинных территориях приводит к необходимости проведения лесозаготовительных работ в холмистой местности, которая часто заболочена. Это характерно не только для Российской Федерации, но и зарубежных стран [34]. Механизированная заготовка дре-



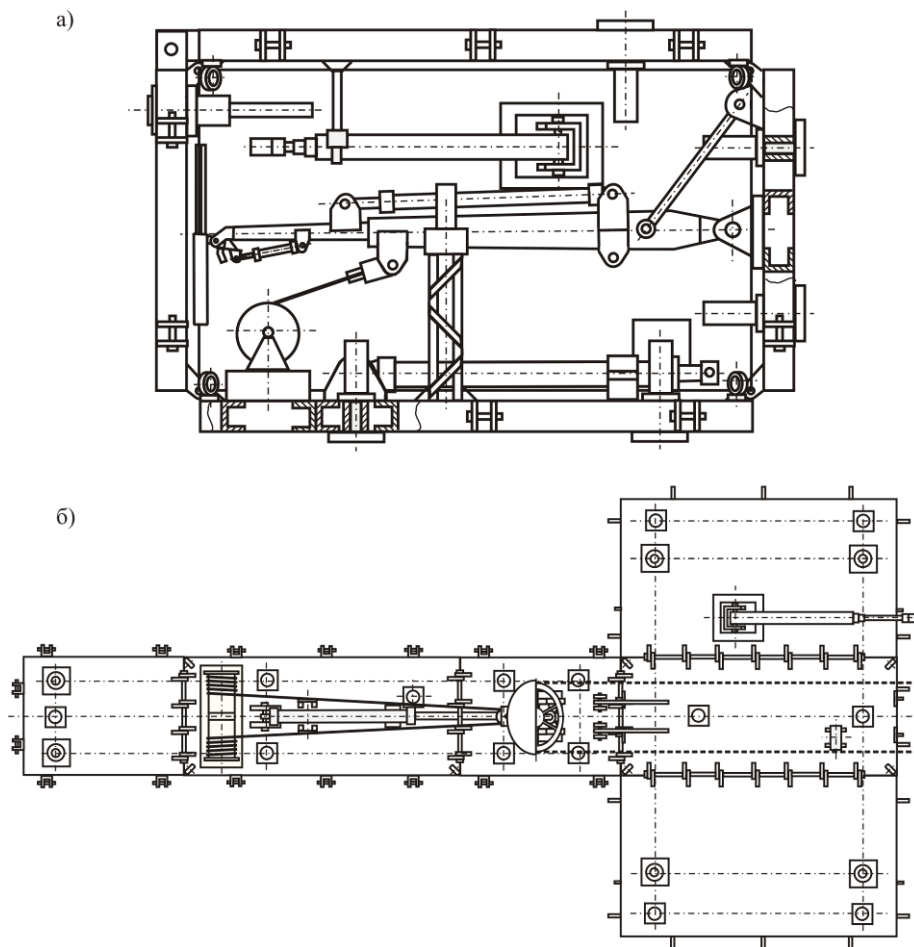


Рис. 3. Общий вид быстромонтируемой аэромобильной канатной дороги контейнерного конструктивного исполнения [33]: а – транспортное положение, вид сбоку; б – рабочее положение, вид сверху

весины на склонах усложняется за счет проблем с обеспечением устойчивости лесозаготовительных машин. Одним из перспективных путей развития механизации лесозаготовительных работ в условиях неблагоприятного рельефа или состояния почвы, наряду с такими очевидными путями решения этой проблемы как использование специальных колесных или гусеничных шасси, анкерных опор или канатных оттяжек, является разработка специализированных канатных лесозаготовительных машин для работы на склонах [35, 36].

Поэтому в 2022 году учеными БГУ имени академика И.Г. Петровского было принято решение расширить спектр фундаментальных и прикладных исследований в области технологических канатных систем на проблемы совершенствования лесных лесозаготовительных работ в неблагоприятных усло-

виях эксплуатации. Вопросы обоснования целесообразности более широкого использования указанного вида мобильных технологических машин, а также анализа возможностей и рациональных условий их применения нашли отражение в [37 - 40]. Было определено, что перспективным направлением является создание роботизированных машин для лесозаготовки на склонах, использующих канатные системы для позиционирования рабочего органа, с помощью которого осуществляется валка, первичная обработка деревьев, а также их доставка в зону временного складирования.

С целью предотвращения аварийных ситуаций, потенциально возможных при эксплуатации лесозаготовительных канатных машин, был разработан цифровой двойник макета лесной мобильной канатной дороги, созданному на базе научно-образовательного центра цифровых технологий Индустрии 4.0 БГУ имени академика И. Г. Петровского [41]. С его

помощью возможно в режиме реального времени прогнозировать и предотвращать аварийные ситуации [42]. Цифровой двойник лесной мобильной канатной дороги включает:

- математическое описание конструкции (в частности, геометрические компьютерные модели, модели описания внешнего вида и др.);

- математическое описание рабочих процессов (в частности, комплексные математические модели для исследования динамики, имитационные мультиагентные модели для оценки факторов нагруженности и внешних воздействий и др.).

С помощью моделей описания конструкции, фиксируется внешний вид машины, а также вычисляются геометрические параметры, которые затем передаются для использования в модели описания рабочих процессов. Комплексные математические модели представляют наибольший интерес при разработке цифровых двойников лесных мобильных канатных дорог, так как для решения других задач используется стандартное программное обеспечение. Цифровой двойник запускается в режиме реального времени на бортовой ЭВМ лесной мобильной канатной дороги. При моделировании используется информация о текущем состоянии всего технического устройства, получаемая с помощью датчиков, входящих в состав системы цифровой компьютерной диагностики канатной транспортирующей машины [43]. В частности, используется информация о текущих положениях элементов мобильной канатной дороги, скоростях и ускорениях, усилиях в несущих элементах и приводах. Таким образом, цифровой двойник - это виртуальный цифровой аналог транспортно-технологической машины, моделирующий на бортовой ЭВМ в режиме реального времени ее внутренние процессы, технические характеристики и поведение с учетом случайных внешних воздействий, параметры которых считываются с датчиков, установленных на реальной машине.

Важной функцией, выполняемой цифровым двойником лесной мобильной канатной дороги, является упреждающее прогнозирование качественных особенностей и количественных параметров изменения во времени технических характеристик функционально-

го состояния системы. С этой целью были разработаны и представлены в [44, 45] методологические подходы и примеры их конкретной реализации к проведению имитационного моделирования режимов работы и основных рабочих процессов применительно к канатным лесозаготовительным машинам для работы на крутых лесистых склонах.

Исходя из результатов имитационного моделирования, выполненного с помощью разработанной компьютерной программы [16], и уже имеющегося опыта моделирования работы канатного оборудования различного функционального назначения [1 - 4], был начат комплекс исследований динамических процессов, происходящих в несущей канатной системе лесной мобильной канатной дороги. Наиболее полно разработанные подходы и математические модели изложены в [46 - 48]. Также полученные результаты динамических исследований были представлены в материалах ряда научных конференций [49 - 52].

Как пример, на рис. 4 показана расчетная схема лесной канатной транспортно-технологической машины с оттяжкой [47], которая дает представление о динамических процессах, протекающих в канатной системе лесной машины в процессе эксплуатации. При работе данной машины тяговый 6 и несущий 7 канаты оказывают упругое воздействие на рабочий орган 4, который совершает сложные колебательные движения как вдоль тягового каната по его длине, так и в вертикальном направлении. Верхняя базовая станция 2 закреплена на склоне упругой стальной канатной оттяжкой 8, вследствие чего она также находится в колебательном движении относительно точки анкерного крепления оттяжки в направлении вдоль склона. Нижняя базовая станция 3 также совершает колебательные движения вдоль склона вследствие крепления к упругому тяговому канату 6. Колебательное перемещение базовых станций также оказывает влияние на колебания рабочего органа 4 из-за динамического нестационарного изменения усилия натяжения несущего каната 7, по которому перемещается рабочий орган 4.

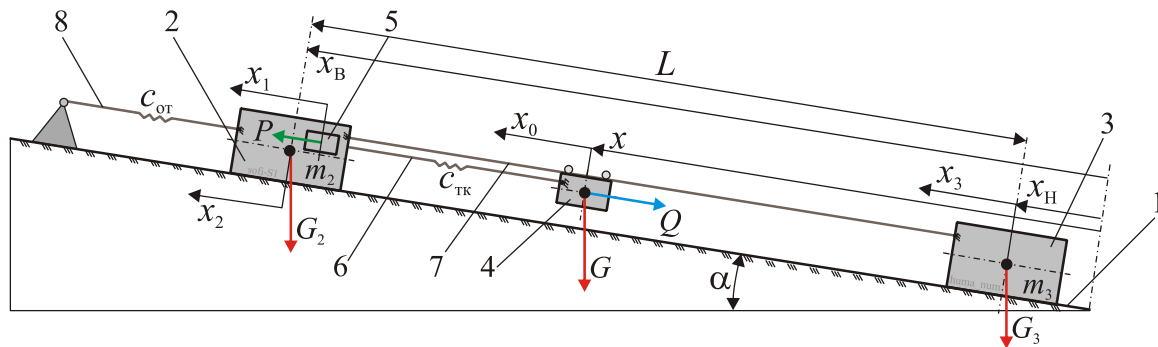


Рис. 4. Расчетная схема канатной транспортно-технологической машины с оттяжкой [47]:  
1 – склон; 2 – верхняя базовая станция (модуль); 3 – нижняя базовая станция (модуль);  
4 – рабочий орган; 5 – лебедка; 6 – тяговый канат; 7 – несущий канат; 8 – оттяжка

Для лесной канатной транспортно-технологической машины характерны два режима работы [46 - 48]:

- режим 1 – рабочий орган перемещается вдоль склона, приводимый в движение лебедкой, что создает дополнительные динамические воздействия на всю систему, при этом базовые станции совершают колебания около положения равновесия, при позиционировании рабочего органа внешние воздействия со стороны предмета труда постоянны или равны нулю (холостой ход);

- режим 2 – рабочий орган покоится на месте, при этом рабочий орган и базовые станции совершают колебания около положения равновесия, как правило, в этом режиме рабочий орган активно взаимодействует с предметом труда, что вызывает интенсивное воздействие на всю систему.

Для каждого из режимов указанная расчетная схема приводит к системе из пяти обыкновенных дифференциальных уравнений I порядка и позволяет моделировать колебательные перемещения в направлениях:

- рабочего органа вдоль тягового каната  $x_0$ ;
- рабочего органа в вертикальном направлении;
- привода лебедки вдоль склона  $x_1$ ;
- верхней базовой станции (модуля) вдоль склона  $x_2$ ;
- нижней базовой станции (модуля) вдоль склона  $x_3$ .

Были рассмотрены и другие конструкции лесных мобильных канатных дорог, в частности, без оттяжки для крепления верхней базовой станции [48].

Проведенные тестовые расчеты показали сложный характер колебательных смещений рабочего органа машины, приводящих как к его заметному смещению относительно положения равновесия, так и к появлению значительных динамических нагрузок в несущих и тяговых канатах с амплитудой в несколько десятков кН. Это свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования режимов и конструкции лесных мобильных канатных машин, направленного на снижение динамических процессов [53].

## 5. Заключение

В 2022 году для проводимых в Брянском государственном университете имени академика И.Г. Петровского научных исследований продолжает реализовываться традиционный подход комплексной взаимосвязи фундаментальных и прикладных решаемых задач. Он базируется на тесном сочетании конструкторских решений новых объектов промышленной собственности и их теоретического анализа на базе разработки соответствующих математических моделей, расчетных методов и реализуемых их расчетных компьютерных программ.

Такой подход оказывается плодотворным с точки зрения разработки взаимоувязанных транспортно-логистических технологий в сфере машиностроения и транспорта, позволяет получать научно обоснованные технические решения применительно к разным типам подвесных канатных транспортно-технологических систем и машин.

### Список литературы

1. Степченко Т.А., Бабич О.В. Научные исследования в области интеллектуальных транспортных технологий и оборудования для реализации концепции «умный город» // Ежегодник НИИ фундаментальных и прикладных исследований. 2019. № 1 (11). С. 162-168.

2. 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.

3. 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.

4. Степченко Т.А., Бабич О.В. Результаты научных исследований Брянского государственного университета в 2021 году в сфере проектирования и моделирования рабочих процессов в мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексах // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 1. С. 7-26. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-07-26.

5. Научный сайт БГУ имени академика И.Г. Петровского. Режим доступа: <https://nauka-brgu.ru/> (дата обращения 03.12.2022).

6. Научно-исследовательская лаборатория транспортно-логистических роботизированных технологий и комплексов безопасной урбанизированной среды. Режим доступа: [https://brgu.ru/science/general-information/nauchnye-podrazdeleniya/nit-transportno-logisticheskie-robotizirovannye-tekhnologii-/](https://brgu.ru/science/general-information/nauchnye-podrazdeleniya/nit-transportno-logisticheskie-robotizirovannye-tekhnologii/) (дата обращения 03.12.2022).

7. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Таричко В.И. Надежность и безопасность эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ,

### References

1. Stepchenko T.A., Babich O.V. Scientific research in field of intellectual transport technologies and equipment for the implementation of the concept "Smart City". Yearbook of the Research Institute of Fundamental and Applied Research, 2019, No.1(11), pp. 162-168 (In Russian)

2. 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)

3. 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, pp. 9-29. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-09-29. (In Russian)

4. Stepchenko T.A., Babich O.V. The results of scientific research of Bryansk State University in 2021 in the field of design and modeling of work processes in mobile transport and overloading rope complexes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.1, pp. 7-26. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-07-26. (In Russian)

5. *Scientific site of the BSU named after Academician I.G. Petrovskii* [site]. Available at: <http://nauka-brgu.ru/> (accessed 03 Dec. 2022). (In Russian)

6. *Research laboratory of transport and logistics robotic technologies and complexes of a safe urbanized environment* [site]. Available at: [https://brgu.ru/science/general-information/nauchnye-podrazdeleniya/nit-transportno-logisticheskie-robotizirovannye-tekhnologii-/](https://brgu.ru/science/general-information/nauchnye-podrazdeleniya/nit-transportno-logisticheskie-robotizirovannye-tekhnologii/) (accessed 03 Dec. 2022). (In Russian)

7. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Nadezhnost i bezopasnost ekspluatatsii mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Reliability and safety

2022. 207 с.

8. 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. DOI: 10.5281/zenodo.1311913

9. 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, 2019. 268 с. DOI: 10.5281/zenodo.3551132

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

11. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Моделирование рабочих процессов мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2021. 204 с. DOI: 10.5281/zenodo.6044972

12. Оптимизация стратегии плановых ремонтов мобильной канатной дороги на базе самоходных шасси / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев. - Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022618775. Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 13.05.2022. Бюл. № 5.

13. Тяговый расчет мобильной канатной дороги на базе самоходных шасси / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев. - Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022667507. Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 21.09.2022. Бюл. № 10.

14. Моделирование динамики канатной машины для лесозаготовки на склоне / А.В. Химич, И.А. Лагерев. – Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022667509. Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 21.09.2022.

15. Определение области возможного использования мобильной канатной дороги на базе самоходных шасси / А.В. Лагерев, И.А. Лагерев. - Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022680690. Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 03.11.2022. Бюл. № 11.

16. Моделирование рабочих процессов канатной машины для лесозаготовки на

of operation of mobile transport and overloading rope complexes]. Bryansk, RISO BGU, 2022. 207 p. (In Russian)

8. 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: 10.5281/zenodo.1311913 (In Russian)

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

10. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Konstruksii 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)

11. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Modelirovanie rabochnik protsessov mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Modeling of working processes of mobile transporting and overloading rope facilities]. Bryansk, RISO BGU, 2021. 204 p. DOI: 10.5281/zenodo.6044972. (In Russian)

12. Lagerev A.V., Lagerev I.A. *Optimizatsiya strategii planovykh remontov mobilnoy kanatnoy dorogi na baze samokhodnykh shassi. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [The strategy optimization of planned repairs of a mobile ropeway based on self-propelled chassis. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2022618775, 2022. (In Russian).

13. Lagerev A.V., Lagerev I.A. *Tyagovyy raschet mobilnoy kanatnoy dorogi na baze samokhodnykh shassi. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya*

склоне / А.В. Химич, И.А. Лагерев. – Свидетво о регистрации программы для ЭВМ 2022680691. Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 03.11.2022.

17. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Kinematic and Force Analysis of the End Tower Positioning Mechanism at Mobile Ropeway // In: Radionov A.A., Gasiyarov V.R. (eds) Proc. of the 7th Int. Conf. on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2022. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-85230-6\_46

18. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Modeling the Reliability Indicators' Kinetics of a Mobile Ropeway Formed by the Self-Propelled Units // Communications - Scientific Letters of the University of Zilina. 2022. № 24(2). С. В106-В119. DOI: 10.26552/com.C.2022.2.В106-В119

19. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Определение усилий натяжения канатов при эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 3. С. 194-210. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-03-194-210

20. Зенков Р.Л., Ивашков И.И., Колобов Л.Н. Машины непрерывного транспорта. М.: Машиностроение, 1987. 432 с.

21. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В.И. Галкин, В.Г. Дмитриев, В.П. Дьяченко, И.В. Запечин, Е.Е. Шешко. М.: МГГУ, 2005. 543 с.

22. Lagerev A.V., Tolkachev E.N., Lagerev I.A. Modelling of a vertical loop conveyor with suspended belt and distributed drive // International Review on Modelling and Simulations. 2016. Vol. 9. № 4. С. 271-279. DOI: 10.15866/iremos.v9i4.9808

23. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Производительность грузовых мобильных канатных дорог на базе сопряженных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 4. С. 310-321. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-04-310-321

24. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Общий подход к созданию цифровых двойников

EVM [Traction calculation of a mobile ropeway based on self-propelled chassis. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2022667507, 2022. (In Russian)

14. Khimich A.V., Lagerev I.A. Modelirovanie dinamiki kanatnoy mashiny dlya lesozagotovki na sklone. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM [Simulation of dynamics of a rope unit for logging on a slope. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2022667509, 2022. (In Russian)

15. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Opreделение oblasti vozmozhnogo ispolzovaniya mobilnoy kanatnoy dorogi na baze samokhodnykh shassi. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM [Determination of the area of possible use of a mobile ropeway based on self-propelled chassis. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2022680690, 2022. (In Russian)

16. Khimich A.V., Lagerev I.A. Modelirovanie rabochikh protsessov kanatnoy mashiny dlya lesozagotovki na sklone. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM [Modeling of working processes of a rope unit for logging on a slope. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2022680691, 2022. (In Russian)

17. 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

18. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Modeling the Reliability Indicators' Kinetics of a Mobile Ropeway Formed by the Self-Propelled Units. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, 2022, Vol. 24, No. 2, pp. B106-B119. DOI: 10.26552/com.C.2022.2.В106-В119

19. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Determination of tension forces of ropes during the operation of mobile transport and reloading rope complexes. *Nauchno-*



опор самоходных шасси мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 4. С. 299-309. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-04-299-310

32. Лагереv И.А., Таричко В.И., Лагереv 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

33. Быстромонтируемая мобильная канатная дорога / А.В. Лагереv, И.А. Лагереv. - Патент РФ на изобретение № 2780877. Заявл. 24.06.2022, № 2022117303. Оpubл. 04.10.2022. Бюл. № 28

34. Шелгунов Ю.В., Горюнов А.К., Ярцев А.К. Лесозаготовка и транспорт леса. М.: Лесная промышленность, 1989. 520 с.

35. Шошин А.О., Протас П.А., Мохов С.П., Арико С.Е. Методика имитационных испытаний одномачтовой канатной установки для полуподвесной трелевки древесины // Труды БГТУ. 2017. №1. С. 102-108.

36. *Special machines – Valentini Teleferiche* [site]. Available at: <https://www.valentini-teleferiche.it/en/soluzioni/special-machines> (accessed 03 Dec. 2022).

37. Лагереv И.А., Химич А.В. Перспективы развития транспортно-технологических машин для заготовки леса на склонах // Сб. мат. III Всеросс. научно-практ. конф. «Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта». Екатеринбург: УрФУ, 2022. С. 64-65.

38. Химич А.В. Особенности механизированной лесозаготовки на склонах // Мат. Всеросс. научно-практ. конф. «Инновационное развитие подъемно-транспортной техники». Брянск: БГТУ, 2022. С. 199-204.

39. Химич А.В. Компьютерное моделирование объемов генерации отходов при лесозаготовке // Сб. тр. II Междунар. научно-практ. конф. «Инженерно-техническое образование и наука». Новороссийск: Новороссийский филиал БГТУ им. В.Г. Шухова,

and construction industries”. Belgorod, BGTU, 2022, pp. 246-249. (In Russian)

27. Lagerev A.V., Lagerev I.A. The main results of the creation of the design and modeling theory of working processes of mobile ropeways. In: *Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference “Actual problems of science and technology. 2022”*. Rostov-on-Don, DGTU, 2022, pp. 486-487. (In Russian)

28. Tarichko V.I., Lagerev I.A. Research of working processes of mobile transport and overloading rope complexes. In: *Proceedings of the XXVI International Scientific and Technical Conference “INTERSTROYMEKH-2022”*. Yaroslavl, YaGTU, 2022, pp. 78-82. (In Russian)

29. Lagerev A.V. Simulation of the hydraulic drive operation of the end tower installation mechanism on a self-propelled chassis as part of a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 110-124. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-110-124 (In Russian)

30. Patent RU 213723, B66C 23/78. *Ustroystvo dlya ustanovki autriggerov transportno-tekhnologicheskoy mashiny* [A device for installing outriggers of a transport and technological machine]. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Declared 08.06.2022. Published 26.09.2022. (In Russian)

31. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Analysis of the operation of a device for installing outriggers of self-propelled chassis of mobile transport and reloading rope complexes. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.4, pp. 299-309. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-04-299-310 (In Russian)

32. 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. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293 (In Russian)

33. Patent RU 2780877, B61B 7/00. *Bystromontiruemaya mobilnaya kanatnaya*



2022. С. 55.

40. Химич А.В. Основные направления развития лесного машиностроения в России // Сб. тр. XIV Междунар. молодежного форума «Образование. Наука. Производство». Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. Ч. 9. С. 128-134.

41. Лагереv И.А., Химич А.В. Создание цифрового двойника лесной мобильной канатной дороги // Сб. мат. Всеросс. (национальной) научно-практ. конф. «Актуальные проблемы науки и техники. 2022». Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2022. С. 488-489.

42. Лагереv И.А., Мильто А.А., Лагереv А.В. Снижение ударной нагрузки, вызываемой люфтом в шарнирных соединениях звеньев крано-манипуляторных установок // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2015. № 2. С. 37-44. DOI: 10.5281/zenodo.1198382

43. Лагереv И.А., Солдатченков С.П. Системы цифровой компьютерной диагностики канатных транспортных машин // Ученые записки Брянского государственного университета. 2022. №1. С. 15-18.

44. Лагереv И.А., Химич А.В., Шкурманова С.С. Подходы к имитационному моделированию рабочих процессов канатной лесозаготовительной машины для работы на склонах // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №2. С. 125-130. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-125-130

45. Химич А.В. Имитационное компьютерное моделирование режимов работы канатной грузоподъемной машины для лесозаготовки на склонах // Ученые записки Брянского государственного университета. 2022. №2. С. 28-30.

46. Лагереv И.А., Химич А.В. Математическое моделирование динамики кабельной грузоподъемной машины // Ученые записки Брянского государственного университета. 2022. №1. С. 7-10.

47. Химич А.В., Лагереv И.А. Исследование динамической нагруженности мобильной канатной транспортно-технологической машины, размещенной на склоне // Научно-технический вестник Брянского государственного университета.

*doroga* [Fast-mounted mobile ropeway]. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Declared 24.06.2022. Published 04.10.2022. (In Russian)

34. Shelgunov Yu.V., Goryunov A.K., Yartsev A.K. *Lesoekspluatatsiya i transport lesa* [Forest exploitation and forest transport]. Moscow, Lesnaya promyshlennost, 1989. 520 p. (In Russian)

35. Shoshin A.O., Protas P.A., Mokhov S.P., Ariko S.E. Metodika imitatsionnykh ispytaniy odnomachtvoy kanatnoy ustanovki dlya polupodvesnoy trelevki drevesiny. *Trudy BGTU*, 2017, No.1, pp. 102-108. (In Russian)

36. *Special machines – Valentini Teleferiche* [site]. Available at: <https://www.valentini-teleferiche.it/en/soluzioni/special-machines> (accessed 03 Dec. 2022).

37. Lagerev I.A., Khimich A.V. Prospects for the development of transport and technological machines for logging on slopes. In: *Proceedings of the III All-Russian scientific and practical conference “Innovative development of land transport equipment and technologies”*. Ekaterinburg, UrFU, 2022, pp. 64-65. (In Russian)

38. Khimich A.V. Features of mechanized logging on slopes. In: *Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference “Innovative development of lifting and transport equipment”*. Bryansk, bgtu, 2022, pp. 199-204. (In Russian)

39. Khimich A.V. Computer modeling of waste generation volumes during logging. In: *Proceedings of the II International scientific and practical conference “Engineering and technical education and science”*. Novorossiysk, Novorossiyskiy filial BGTU im. V.G. Shukhova, 2022, p. 55. (In Russian)

40. Khimich A.V. The main directions of development of forest engineering in Russia. In: *Proceedings of the XIV International youth forum “Education. Science. Production”*. Belgorod, BGTU im. V.G. Shukhova, 2022, Vol. 9, p. 128-134. (In Russian)

41. Lagerev I.A., Khimich A.V. Creating a digital twin of a forest mobile ropeway. In: *Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference “Actual problems of science and technology. 2022”*. Rostov-on-Don,

2022. №2. С. 159-164. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-159-164

48. Химич А.В., Лагереv И.А. Математическое моделирование динамики канатной грузоподъемной машины с учетом влияния тягового и несущего канатов // Ученые записки Брянского государственного университета. 2022. №2. С. 31-35.

49. Лагереv И.А., Химич А.В. Моделирование динамики канатной машины для лесозаготовки // Мат. Всеросс. научно-практ. конф. «Инновационное развитие подъемно-транспортной техники». Брянск: БГТУ, 2022. С. 80-84.

50. Лагереv И.А., Химич А.В. Динамика канатной лесозаготовительной машины с учетом переменной жесткости каната // Научному прогрессу – творчество молодых: сб. научн. тр. Международ. молодежной научн. конф. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2022. С. 74-75.

51. Лагереv И.А., Химич А.В. Оценка динамических усилий в канатах перспективной лесозаготовительной машины // Научному прогрессу – творчество молодых: сб. научн. тр. Международ. молодежной научн. конф. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2022. С. 76-78.

52. Химич А.В. Исследование динамики канатной транспортной машины, размещенной на крутом склоне // Сб. тр. VIII научно-практ. конф. «Новые горизонты» с междунар. участием. Брянск: БГТУ, 2022. С. 634-637.

53. Лагереv И.А., Мильто А.А., Лагереv А.В. Эффективность упругого демпфирования в шарнирных соединениях стрел краноманипуляторных установок при повышенных зазорах // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2016. № 1. С. 18-36. DOI: 10.5281/zenodo.1198446

DGTU, 2022, pp. 488-489. (In Russian)

42. Lagerev I.A., Milto A.A., Lagerev A.V. Reducing the impact load arising from the looseness in joints of articulating cranes. *Nauchno-tekhnichestkiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No.2, pp. 37-43. DOI: 10.5281/zenodo.1198382 (In Russian)

43. Lagerev I.A., Soldatchenkov S.P. Computer digital diagnostic of the rope transport vehicles systems. *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.1, pp. 15-18. (In Russian)

44. Lagerev I.A., Khimich A.V., Shkurmanova S.S. Approaches to simulation modeling of working processes of a rope logging machine for working on slopes. *Nauchno-tekhnichestkiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 125-130. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-125-130 (In Russian)

45. Khimich A.V. Computer simulation of the modes of operation of the cable lifting machine for logging on the slopes. *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 28-30. (In Russian)

46. Lagerev I.A., Khimich A.V. Mathematical modeling of dynamics cable lifting machine. *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.1, pp. 7-10. (In Russian)

47. Khimich A.V., Lagerev I.A. The dynamic loading study of a mobile transport and technological machine, placed on a slope. *Nauchno-tekhnichestkiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 159-164. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-159-164 (In Russian)

48. Khimich A.V., Lagerev I.A. Mathematical modeling of dynamics cable lifting machine with the influence of traction and load-bearing ropes. *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 31-35. (In Russian)

49. Lagerev I.A., Khimich A.V. Modeling the dynamics of a rope unit for logging. In: *Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference "Innovative development of lifting and transport equipment"*. Bryansk,

- † BGTU, 2022, pp. 80-84. (In Russian)
- † 50. Lagerev I.A., Khimich A.V. Dynamics of the rope logging machine taking into account the variable stiffness of the rope. In: *Proceedings of the International youth scientific conference "Scientific progress – creativity of the young"*. Yoshkar-Ola, PGTU, 2022, Vol. 9, p. 74-75. (In Russian)
- † 51. Lagerev I.A., Khimich A.V. Evaluation of dynamic forces in the ropes of a promising logging machine. In: *Proceedings of the International youth scientific conference "Scientific progress – creativity of the young"*. Yoshkar-Ola, PGTU, 2022, Vol. 9, p. 76-78. (In Russian)
- † 52. Khimich A.V. Investigation of the dynamics of a ropeway transport vehicle placed on a steep slope. In: *Proceedings of the VIII scientific and practical conference "New horizons" from the international participation*. Bryansk, BGTU, 2022, pp. 634-637. (In Russian)
- † 53. Lagerev I.A., Milto A.A., Lagerev A.V. Effectiveness of elastic damping in the pivot joints of cargo boom of crane-manipulating installations at large gaps. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No.1, pp. 18-36. DOI: 10.5281/zenodo.1198446 (In Russian)