

УДК (UDC) 608.4

РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БРЯНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
 УНИВЕРСИТЕТА В СФЕРЕ МОБИЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ
 КАНАТНЫХ СИСТЕМ И КОМПЛЕКСОВ

RESULTS OF SCIENTIFIC RESEARCH OF BRYANSK STATE UNIVERSITY IN
 THE SPHERE OF MOBILE TRANSPORTATION AND HANDLING ROPE
 SYSTEMS AND ROPEWAYS

Степченко 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 транспортно-перегрузочных канатных систем и дорог на базе самоходных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости и создания научно обоснованных методов их проектирования и компьютерного моделирования рабочих процессов при эксплуатации. Дано описание и анализ эффективности новых технических решений мобильных пассажирских и грузовых подвесных канатных дорог.

Ключевые слова: мобильные канатные дороги, мобильные канатные комплексы, моделирование, проектирование, оптимизация.

Дата принятия к публикации: 28.01.2021
Дата публикации: 25.03.2021

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 scientific research activities of scientists of the Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University in the development of promising domestic samples of designs of mobile transport and reloading rope systems and ropeways based on self-propelled wheeled chassis of high carrying capacity and cross-country ability and the creation of scientifically substantiated methods for their design and computer simulation of work processes during operation. The description and analysis of the effectiveness of new technical solutions of mobile passenger and cargo aerial ropeways are given.

Keywords: mobile ropeways, self-propelled wheeled chassis, modeling, design, optimization.

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

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

Приоритетным направлением научно-теоретических и научно-практических исследований ученых Брянского государственного университета имени академика И.Г.

Петровского в области машиноведения и машиностроения является разработка перспективных отечественных образцов конструкций мобильных транспортно-перегрузочных канатных систем и комплексов, обладающих высокими показателями надежности

и экономичности, а также создание научно обоснованных методов их проектирования и компьютерного моделирования рабочих процессов при эксплуатации. Указанные исследования проводятся в соответствии с планами развития научной деятельности университета [1] и научно-исследовательской лаборатории транспортно-логистических роботизированных технологий и комплексов безопасной урбанизированной среды [2] при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук (проект № МД-422.2020.8).

Создание мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов практически началось только в последние годы и поэтому в этом вопросе разработки исследователей БГУ им. акад. И.Г. Петровского, позволяющие дать научно обоснованные технико-экономические и технологические решения при проектировании и эксплуатации подобного типа машин, занимают лидирующие позиции [3].

Актуальность научных разработок по данной проблематике обусловлена тем, что мобильные подвесные канатные дороги на основе мобильных канатных комплексов позволяют проводить погрузочно-разгрузочные, транспортные и перегрузочно-переправочные операции в заранее не обустроенных или труднодоступных местностях со сложным природным рельефом, обеспечивают оперативное развертывание необходимых технологических средств. В настоящее время они рассматриваются в качестве перспективного вида подъемно-транспортной техники [4-7]. Высокая мобильность данного типа грузовых канатных транспортных систем обусловлена их размещением на специальных многоосных шасси высокой грузоподъемности и проходимости базовых колесных или гусеничных машин многоцелевого назначения [8, 9].

Результаты исследований ученых БГУ имени академика И.Г. Петровского были обобщены в монографиях [4, 10], подготовленных сотрудниками университета в сотрудничестве со специалистами АО «Брянский автомобильный завод», входящего в АО

«Концерн ВКО «Алмаз-Антей». Монография [10] является, по сути, первой в мировой научно-инженерной практике обобщающей научной публикацией, посвященной описанию возможных перспективных конструкций (в том числе, защищенных патентами РФ [11-14]) и созданию взаимоувязанного комплекса расчетных методов проектирования и моделирования рабочих процессов при эксплуатации мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Представленные в монографии методы проектирования, включающие расчет компоновки основного технологического оборудования на многоосных колесных базовых шасси высокой проходимости и грузоподъемности, следует рассматривать как первый шаг к решению объемной и разноплановой проблемы конструирования и изготовления самоходных концевых станций для мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, обладающих высокими показателями качества, включая высокие показатели надежности, экономичности, технологичности производства, безопасности и экологичности эксплуатации. В связи с высокой вычислительной сложностью разработанных расчетных методов были созданы и защищены как объекты интеллектуальной деятельности, правообладателем которых является БГУ им. акад. И.Г. Петровского, компьютерные программы [15-19], позволяющие обеспечить современный уровень автоматизации проектирования (включая оптимальное проектирование) и подготовки производства.

2. Разработка концептуальных подходов к созданию мобильных многоцелевых канатных систем нового поколения

Как показано в [10], наиболее простой по конструктивному исполнению и номенклатуре используемых узлов и механизмов является мобильная подвесная канатная дорога на основе мобильного канатного комплекса маятникового типа с одиночным несущим тяговым канатом, схема которой показана на рис. 1. Она включает две концевые базовые станции, установленные в конечных точках

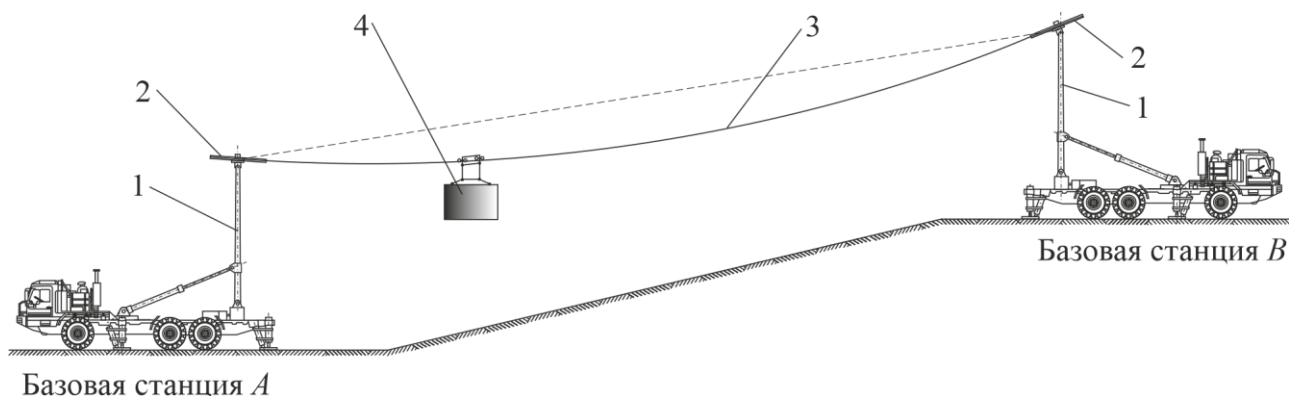


Рис. 1. Схема мобильной канатной дороги [10]: 1 – концевая опора; 2 – канатный шкив; 3 – несущий канат; 4 – транспортируемый груз на подвеске

трассы. Концевые опоры являются поддерживающей конструкцией для канатных шкивов, снабженных тяговым и натяжным механизмами. В процессе эксплуатации одна из концевых станций обеспечивает перемещение несущего каната с закрепленным на нем с помощью подвески транспортируемым грузом, а вторая – необходимое натяжение несущего каната. В состав комплекта мобильной канатной дороги также входит дополнительное технологическое оборудование – устройства торможения, демпфирования продольных и поперечных колебаний подвижного состава, контроля положения тягового и несущего канатов, подвешивания канатов на промежуточных опорах и др.

Однако возможны другие альтернативные варианты конструктивного исполнения мобильных канатных дорог, каждый из которых обладает как определенными технико-экономическими преимуществами, так и недостатками [20]. Указанные варианты отличаются особенностями конструкции их канатной системы (рис. 2), состоящей из совокупности несущих (Н), тяговых (Т) или несущего-тяговых (НТ) канатов. Несущие канаты воспринимают весовые нагрузки со стороны транспортируемого груза и грузозахватных подвесок или подвесных кабин, а тяговые канаты обеспечивают их перемещение вдоль трассы дороги между пунктами загрузки-разгрузки. Комбинированные несущего-тяговые канаты совмещают обе указанные функции, что позволяет создавать подвесные канатные системы на основе одиночного каната. Ука-

занные канаты могут быть кольцевыми (Тк, Нк, НТк) и линейными (Тл, Нл, НТл).

Важным элементом мобильной канатной дороги, определяющим ее производительность и удобство обслуживания в процессе эксплуатации, является погрузочно-разгрузочное оборудование (для грузовых дорог) или оборудование для посадки-высадки пассажиров. С этой целью возможно использование как простейших трапов, аппарелей или рампы для самоходной или буксируемой техники и пассажиров, так и механизированных подъемно-транспортных установок – краноманипуляторов [21] или коротких конвейеров различных типов [21-23] (как отдельно, так и в комплексе).

При разработке концепции создания мобильных многоцелевых канатных систем нового поколения важную роль играет формирование комплексной математической модели, которая определяет принципиальные особенности научных основ проектирования, прогнозирования, анализа и моделирования канатных систем как единой совокупности взаимосвязанных компонентов, так и как отдельных самостоятельных компонентов. Основные требования и черты комплексной математической модели были разработаны в [5, 24]. Она позволяет исследовать рабочие процессы мобильных канатных дорог, оборудование которых смонтировано на шасси различного типа. Комплексная математическая модель включает в себя ряд взаимосвязанных подмоделей, с помощью которых моделируются рабочие процессы отдельных элементов рассматриваемой системы: подмоде-

ли деформируемого опорного основания, базового шасси, канатной системы, грузовой кабины с подвеской. Подмодели связаны

между собой совместными параметрами, что позволяет учитывать при моделировании наличие обратных связей между подсистемами.

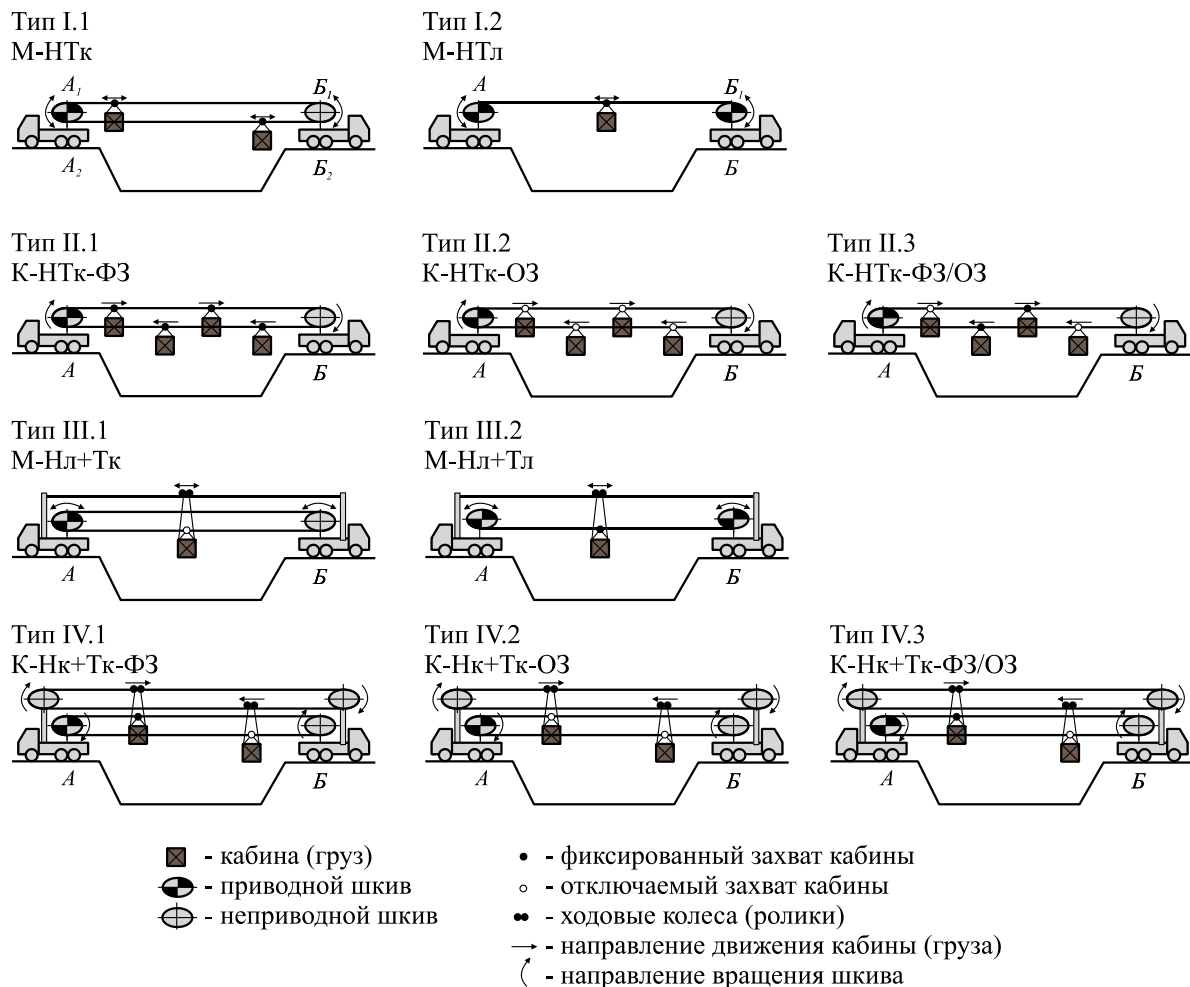


Рис. 2. Альтернативные варианты конструктивного исполнения мобильных канатных дорог [20]

3. Разработка перспективных конструкций мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов

Фундаментальные научные и прикладные опытно-конструкторские разработки ориентированы на создание мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов (концевых базовых станций), представляющих собой самоходные колесные или гусеничные специальные шасси высокой проходимости и грузоподъемности с размещенным на них основным технологическим оборудованием канатной несущо-тяговой системы для транспортировки грузов или людей.

В качестве конечных базовых станций в [10] представлена достаточно широкая гамма конструкций, отличающихся разнообразием кинематических схем механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении. В основу предложенной классификации модификаций конструктивного исполнения базовых станций положены следующие классификационные признаки:

- число осей шасси базовой станции;
- место расположения концевой опоры в рабочем состоянии (концевого или центрального с опиранием на несущую раму шасси, выносного с опиранием на грунт);
- вариант установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении (установка непосредственно подъемным гидроцилиндром,

комбинированная вспомогательным и основным подъемными гидроцилиндрами, с помощью шарнирно-сочлененной складывающейся штанги; фиксация гидравлическая, канатная, канатно-гидравлическая);

- использование дополнительных тормозных устройств против самопрокидывания концевой опоры при ее установке в рабочее положение (механических или гидравлических);

- длина концевой опоры.

На рис. 3 приведена одна из разработанных модификаций концевых базовых станций на основе 4-осного шасси с центральным расположением концевой опоры и ее опиранием на несущую раму шасси при установке непосредственно подъемным гидроцилиндром и гидравлической фиксации в рабочем положении [10, 11].

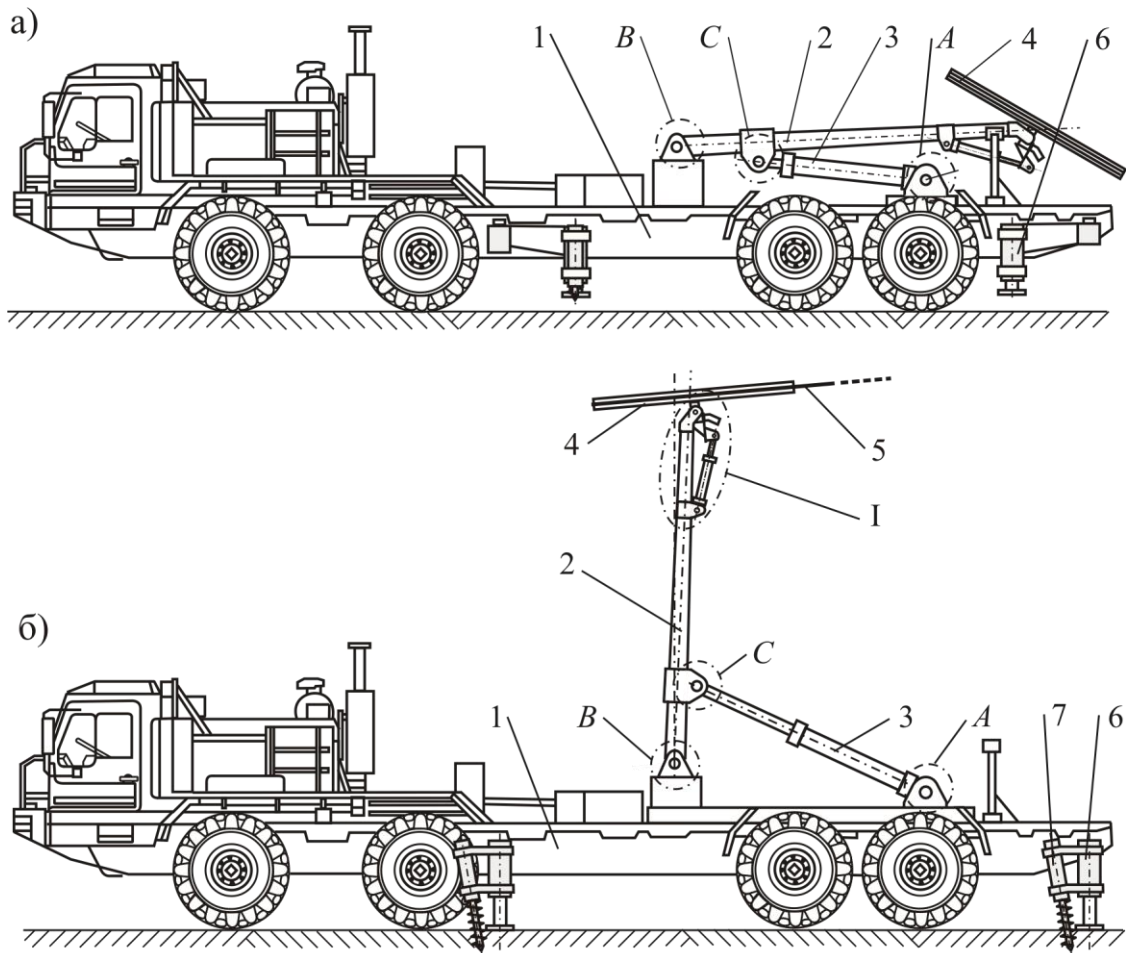


Рис. 3. Общий вид концевой базовой станции (вид сбоку) с центральным расположением опоры при опирании на несущую раму шасси [10, 11]: а - транспортное положение концевой опоры; б - рабочее положение концевой опоры (1 – несущая рама базового шасси; 2 – концевая опора; 3 – подъемный гидроцилиндр; 4 – канатный шкив; 5 – несуще-тяговый канат; 6 – аутригер; 7 – анкерное устройство; А – шарнир крепления гидроцилиндра к надрамной конструкции шасси; В – шарнир крепления концевой опоры к надрамной конструкции шасси; С – шарнир крепления концевой опоры и подъемного гидроцилиндра; I – механизм привода и пространственной ориентации канатного шкива)

Непосредственно на несущей раме шасси монтируются конструктивные узлы и элементы механизма установки и фиксации в рабочем положении концевой опоры мобильного комплекса, включая саму концевую

опору, приводной гидроцилиндр механизма, гидравлическое тормозное устройство для предохранения концевой опоры от самопрокидывания в процессе ее поворота в рабочее положение. Концевая опора служит в

качестве поддерживающей конструкции для конструктивных элементов механизма движения несущего каната, включая канатный шкив. Концевая опора и приводной гидроцилиндр кинематически связаны между собой и несущей рамой цилиндрическими шарнирами A , B и C . К месту назначения мобильный канатный комплекс выдвигается, имея концевую опору в транспортном положении (рис. 3, а). При достижении места назначения базовое шасси ориентируется таким образом, чтобы его продольная ось совпадала с продольной осью канатной дороги. Для обеспечения общей устойчивости в условиях действия значительных горизонтальных опрокидывающих нагрузок от силы натяжения несущего каната и транспортируемого груза мобильный комплекс выставляется на аутригеры, которые закрепляются на грунте с помощью дополнительных анкерных устройств. В их качестве могут быть использованы известные конструкции аутригеров с анкерными устройствами [12, 13, 24]. Концевая опора с помощью приводного гидроцилиндра поворачивается в вертикальной плоскости относительно цилиндрического шарнира B , занимая свое рабочее положение (рис. 3, б). При установке концевой опоры необходимо обеспечить согласование взаимного расположения канатных шкивов сопрягаемых мобильных канатных комплексов, формирующих трассу подвешенной канатной дороги на местности и объединяемых в единую канатную транспортную систему с помощью общего несущего каната.

4. Разработка общих вопросов проектирования канатных комплексов

Мобильность концевых базовых станций предъявляет жесткие требования к их максимальному вертикальному габаритному размеру. Он должен обеспечивать возможность транспортировки станций к месту назначения различными способами – перемещением на собственных шасси по автомобильным дорогам общего назначения, с помощью железнодорожных, авиационных и водных перевозок. Таким образом, размеще-

ние основного технологического оборудования мобильного канатного комплекса с учетом необходимых габаритных размеров его отдельных конструктивных узлов и требований по их сопряжению в единое устройство должно учитывать действующие в России и за рубежом нормативные ограничения на максимально допустимую величину вертикального габарита для автомобильных [26] и железных [27] дорог, грузовых отсеков транспортных воздушных судов подходящей грузоподъемности [28], палубного или трюмного размещения на речных и морских судах. В [29] были предложены математические модели, обеспечивающие проведение кинематического и силового анализа кинематической схемы гидравлического механизма установки и фиксации концевой опоры. Анализ этих моделей позволил установить необходимые условия, которые должны быть выполнены для обеспечения нормативных требований передвижения мобильного комплекса по автомобильным дорогам общего пользования, а также оценить влияния конструктивных размеров основного технологического оборудования на габариты мобильного канатного комплекса в транспортном положении. Также были установлены и проанализированы условия расположения и длины подъемного гидроцилиндра концевой опоры, обеспечивающие необходимое перемещение опоры из транспортного положения в рабочее, выявлено наличие значительной зоны недопустимого расположения шарнирного узла крепления штока гидроцилиндра к металлоконструкции концевой опоры. В [29] проблема компоновки была рассмотрена с позиции учета статических и динамических параметров базового шасси на нагруженность его передней и задней подвесок в зависимости от распределения весовых нагрузок со стороны технологического оборудования. Разработанные динамические модели позволили установить, что более благоприятным является смещение центра тяжести основного технологического оборудования в сторону задней подвески, обладающей большей жесткостью, что свидетельствует о предпочтительности концевой опоры на базовом шасси.

Условием получения достоверных данных о работе мобильных транспортно-технологических канатных комплексов является, как того требует комплексная математическая модель [5, 10, 24], учет взаимного влияния шасси и основного технологического оборудования. С этой целью в [31] был разработан подход к имитационному моделированию режимов движения мобильной транспортно-технологической машины. Процедура моделирования является двухэтапной и включает построение массива случайных реализаций процесса движения мобильной колесной машины [18]. Для каждой случайной реализации на первом этапе с помощью имитационной модели случайным образом с помощью метода Монте-Карло формируется график движения, представляющий собой случайную последовательность чередования различных режимов движения (стоянка, разгон, торможение и движение с постоянной скоростью) со случайно заданными для каждого режима его основными количественными характеристиками (скоростью, длительностью и др.). На втором этапе для каждой случайной реализации с помощью динамической математической модели исследуются рабочие процессы мобильной транспортно-технологической машины с определением количественных параметров нагруженности ее шасси. Массив случайных реализаций процесса движения мобильной колесной машины при ее движении к месту установки по автомобильным дорогам дает полное представление о случайном характере динамической нагруженности конструктивных узлов шасси базовой концевой станции (подвесок и несущей рамы) и дает возможность дальнейшего анализа динамической нагруженности методами теории случайных процессов. Использование результатов моделирования режимов движения мобильной машины позволяет не только определить параметры законов изменения характеристик нагруженности (например, построить блоки циклических напряжений в опасных сечениях конструкции), но и оценить историю нагружения (процессы чередования высоких и низких значений амплитуд колебаний), что особенно важно при оценке живучести. Предложенный под-

ход целесообразно применять при оценке нагруженности на этапе проектирования инновационных образцов мобильных транспортно-технологических канатных комплексов. В [32] предложены динамические математические модели, позволяющие выполнять расчет и анализ рабочих процессов в основных структурных схемах трансмиссий базовых концевых станций мобильных канатных дорог (рис. 4). Модели представляют собой уравнения движения инерционных элементов, соединенных упруго-диссипативными связями. Для верификации разработанных расчетных моделей были проведены экспериментальные исследования редукторов трансмиссии колесного шасси на специально разработанном для этого испытательном стенде. Наиболее перспективным видом привода мобильных канатных дорог оказалась гидромеханическая трансмиссия, в которой гидронасосы приводятся в движение от механической трансмиссии базовой машины через коробку отбора мощности.

В рамках четвертой промышленной революции и перехода к технологиям Индустрии 4.0 ключевое значение имеет создание цифровых двойников объектов или процессов [33]. В условиях разработки и исследования нового поколения канатных транспортных систем в виде мобильных канатных дорог создание таких цифровых двойников является необходимым условием всесторонней конструкторской проработки перспективных образцов мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов в целом и их отдельных ключевых узлов и механизмов. С использованием такого подхода возможно определить оптимальную структуру и параметры создаваемого оборудования, избежать существенных ошибок, ускорить процесс опытно-конструкторских работ и внедрения в эксплуатацию. В [34] разработаны методологические подходы к созданию и применению цифровых двойников на различных этапах жизненного цикла мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, оборудование которых смонтировано на базе колесных или гусеничных шасси большой грузоподъемности и проходимости. Целью

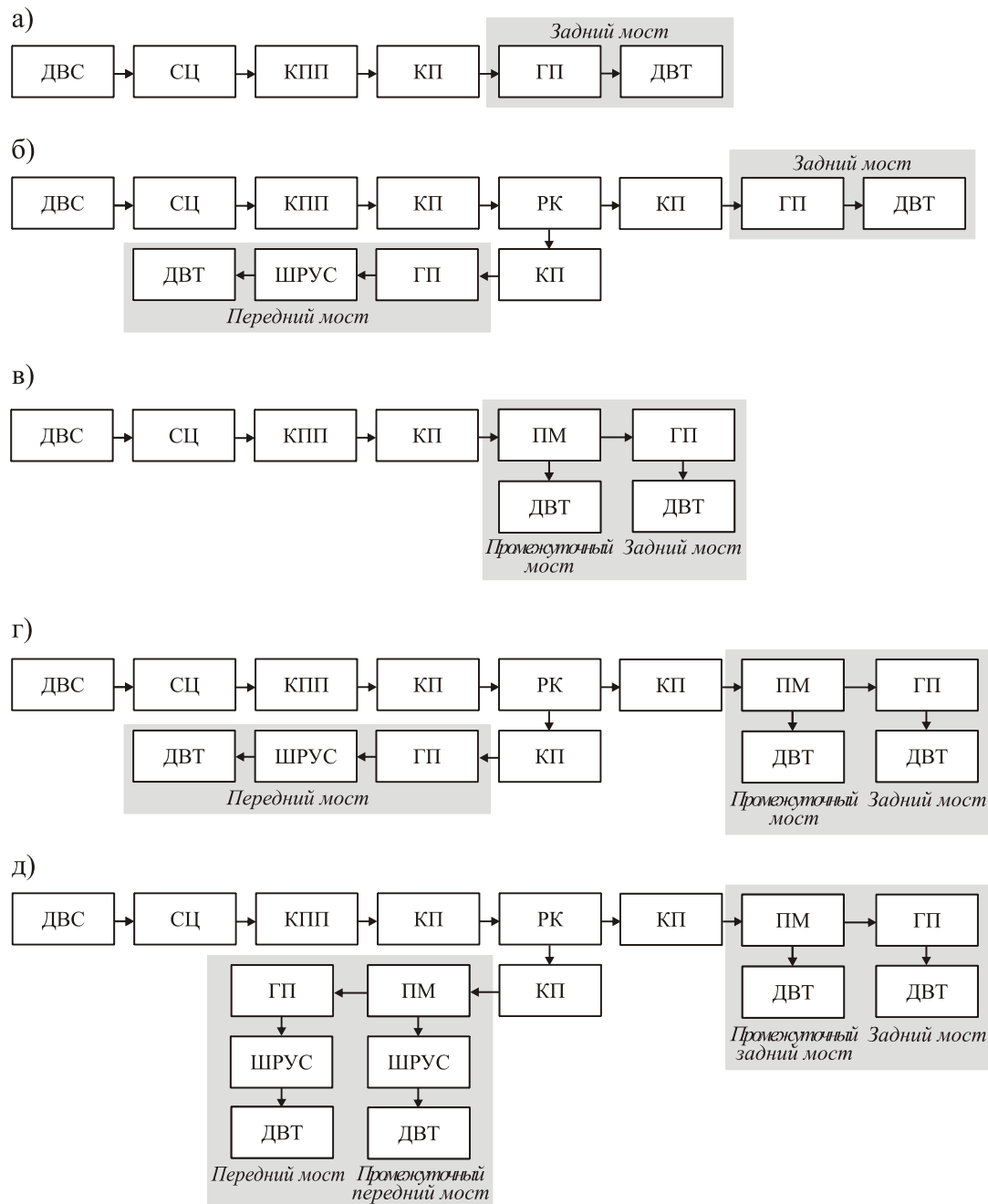


Рис. 4. Структурные схемы механической трансмиссии базовой станции мобильной канатной дороги на колесном шасси [32]: а – шасси 4х2; б – шасси 4х4; в – шасси 6х4; г – шасси 6х6; д – шасси 8х8 (ДВС – двигатель внутреннего сгорания; СЦ – сцепление; КПП – коробка переключения передач; РК – раздаточная коробка; КП – карданная передача; ГП – главная передача; ШРУС – шарнир равных угловых скоростей; ПМ – передача промежуточного моста; ДВТ – движитель)

исследований являлось повышение безопасности использования подобных транспортных систем на основе прогнозирования в режиме реального времени потенциальных отказов для своевременного предотвращения возникновения аварийных ситуаций. Для анализа аварийно опасных рабочих процес-

сов использовалось имитационное моделирование динамики системы с применением комплексных математических моделей [5, 24]. Разработанная методика была протестирована на базе масштабного макета мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса, созданного методами 3D-печати

[4, 35]. На примере случая буксования несущего тягового каната экспериментально показана возможность прогнозирования отказов в работе макета. Для этого сравнивалось реальное значение координаты точки подвеса груза, полученное с помощью метода обработки видеопотока, с прогнозируемым значением, вычисленным с помощью цифрового двойника. Результаты исследования показывают, что создание промышленного цифрового двойника мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса вполне достижимо и перспективно на этапе проектирования.

5. Анализ безопасности и надежности эксплуатации канатных комплексов

Важное значение для безопасной эксплуатации мобильных транспортно-технологических машин имеет проблема обеспечения их общей устойчивости против опрокидывания в процессе эксплуатации под действием системы опрокидывающих и удерживающих моментов, зависящих от веса груза, исполнительных механизмов и базового шасси, динамических, ветровых и инерционных нагрузок [36]. Для повышения общей устойчивости автомобильные краны, краны-манипуляторы, экскаваторы, вышки и подъемники оборудуются выносными опорами, которые в ряде случаев дополнительно комплектуются анкерными устройствами различной конструкции [25]. В отличие от перечисленных видов мобильных грузоподъемных машин, общая устойчивость базовых станций мобильных канатных дорог в большей степени определяется действием не вертикальных, а горизонтальных нагрузок, обусловленных натяжением несущего тягового каната натяжным устройством и весом транспортируемого груза и действующих в плоскости канатного шкива. Как следствие, известные в настоящее время методики оценки устойчивости против опрокидывания технологических машин требуют пересмотра и уточнения применительно к мобильным концевым станциям мобильных канатных дорог. В [37] была разработана математическая модель расчета запаса общей устойчи-

вости колесных базовых станций, на основе которой был выполнен сравнительный анализ вариантов размещения не анкеруемых и анкеруемых выносных опор на шасси базовых машин, а также были выявлены возможности выносных опор различного конструктивного исполнения по компенсации воздействия горизонтальных и вертикальных эксплуатационных нагрузок. Предложенные расчетные зависимости позволяют произвести предварительную количественную оценку запаса общей устойчивости базовой станции мобильной канатной дороги в продольном и поперечном направлении. На конструкцию выносной опоры со встроенным анкерным устройством прокалывающего типа были получены патенты Российской Федерации [13, 14]. Модель прогнозирования процесса потери общей устойчивости базовыми колесными станциями построена с учетом взаимодействия анкерного устройства с грунтом в рамках динамической системы «груз – манипуляционная система – базовое шасси – выносная опора – анкерное устройство – опорное основание». Она учитывает возможные варианты начального уплотнения грунта в районе внедрения анкерного устройства аутригера, что вызывает изменение его жесткостных характеристик, учитываемых при моделировании. Поэтому при ее использовании удастся исследовать пограничные состояния, когда концевая станция находится на грани потери устойчивости и ее окончательное опрокидывание может произойти от воздействия незначительного по величине дополнительного ветрового воздействия или инерционной нагрузки [38].

Эксплуатация мобильных канатных комплексов связана с риском возникновения и развития аварийных ситуаций, приводящих к негативному воздействию на перевозимых людей или транспортируемые грузы. В настоящее время применительно к существующим стационарным грузовым и пассажирским канатным дорогам прогнозирование и анализ риска аварийных ситуаций на стадии проектирования основаны на построении деревьев отказов [39, 40]. Основная проблема успешного применения этого ме-

тогда заключается в том, что количественные расчеты вероятностей наступления отказов технических систем требуют знания вероятностей индивидуальных отказов всех конструктивных элементов этих систем. Однако такая информация крайне ограничена и не отражает в полной мере индивидуальные особенности конструкции, режимов и продолжительности работы, а также эффективность проводимых ремонтных мероприятий. Для преодоления указанной трудности в [41, 42] был разработан метод моделирования протекания во времени процесса изменения показателей надежности ключевого структурного элемента мобильного канатного комплекса – канатной системы в целом, реализованный в виде компьютерной программы [16]. Для этого была определена обобщенная структурная схема типовой канатной системы (рис. 5), включающей три основные подсистемы (гидравлическую, механиче-

скую, информационно-управляющую) и структурные схемы указанных подсистем, а также примерный перечень структурных элементов этих подсистем. Метод базируется на разработанной вероятностной математической модели. На стадии проектирования мобильного канатного комплекса она позволяет прогнозировать кинетику показателей надежности при эксплуатации канатной системы как в целом, так и ее отдельных подсистем и конструктивных элементов с учетом сроков и объемов проведения ремонтно-восстановительных работ, а также проводить моделирование эксплуатационной стадии жизненного цикла. Расчет вероятности нахождения канатной системы в возможных сочетаниях ее состояний в произвольный момент времени основан на решении системы линейных дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена,

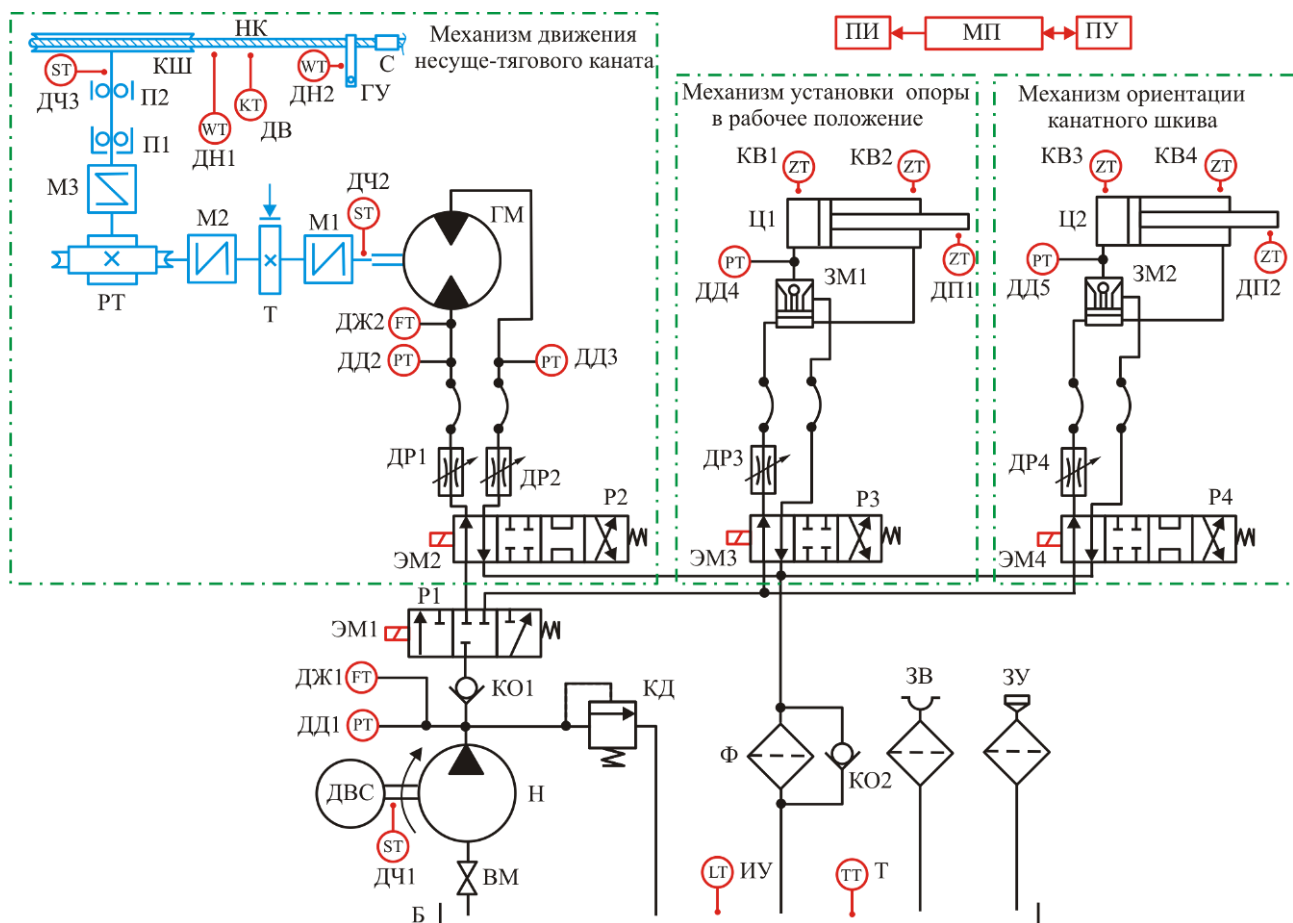


Рис. 5. Обобщенная структурная схема канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса [41]

которая периодически перестраивается в моменты времени проведения плановых ремонтов мобильного канатного комплекса [43]. Использование рассмотренного метода [41, 42] позволяет на стадии проектирования самоходной концевой станции получить исходные данные, необходимые для расчета и оптимизации технического риска эксплуатации канатной системы в соответствии с известными подходами [44, 45].

Сложные условия эксплуатации мобильных канатных дорог объективно усложняют проведение необходимых ремонтно-восстановительных мероприятий в неподготовленных полевых условиях. Несмотря на проведение плановых ремонтов и технических обслуживания, которые приурочиваются к моментам времени нахождения мобильных канатных комплексов в режиме ожидания в местах их постоянной дислокации, в условиях эксплуатации могут происходить случайные критические отказы структурных элементов канатных систем. Их возникновение требует немедленной остановки работы мобильного канатного комплекса и проведения мероприятий по внеплановому восстановлению работоспособного состояния в полевых условиях. Это нежелательно как из-за прерыва в выполнении транспортно-перевозочных операций, так и из-за усложнения ремонтно-восстановительных работ по сравнению с ремонтом в стационарных условиях. Одним из возможных подходов к снижению негативных последствий случайных критических отказов конструктивных элементов канатной системы в условиях эксплуатации является упреждающая замена во время планового ремонта в стационарных условиях тех элементов, у которых вероятность потери работоспособного состояния достигает к моменту такого ремонта определенного, заданного на этапе проектирования предельно допустимого значения вероятности критического отказа [41, 42]. На основе указанного подхода в [46] была разработана методика формирования эффективной технико-экономической стратегии восстановления критически опасных структурных элементов канатной системы во время плановых ремон-

тов, предназначенная для использования на стадии проектирования мобильных канатных комплексов при определении стратегии их планово-предупредительных ремонтов. Методика базируется на прогнозировании кинетики вероятности безотказной работы канатной системы в целом в течение всего срока ее эксплуатации, исходя из прогнозирования безотказной работы тех структурных элементов системы, отказ которых приводит к аварийному нарушению работы мобильного канатного комплекса [41, 42]. Моделирование включает интегрирование системы дифференциальных уравнений Колмогорова-Чепмена, модифицированной в связи с необходимостью дискретного изменения вероятности безотказной работы элементов, подлежащих замене в моменты времени проведения плановых ремонтов. В качестве технико-экономического критерия эффективности стратегии восстановления канатной системы принято условие получения минимально возможной суммарной стоимости ремонтов канатной системы в течение всего срока ее эксплуатации при обеспечении среднего значения вероятности безотказной работы в течение всего срока эксплуатации, нормируемого в техническом задании на проектирование мобильного канатного комплекса. Формирование указанной стратегии включает планирование графиков проведения, числа, моментов времени, объемов и стоимости плановых ремонтно-восстановительных мероприятий канатной системы. Разработанная методика восстановления работоспособности канатной системы была реализована в виде компьютерной программы [19]. Предложенный в [46] подход позволяет поддерживать исходно заданный при проектировании уровень надежности канатной системы на основе упреждающей замены во время планового ремонта в стационарных условиях тех ее структурных элементов, у которых вероятность потери работоспособного состояния достигает к моменту такого ремонта определенного, заданного на этапе проектирования предельно допустимого значения вероятности критического отказа. При этом решается технико-экономическая задача: обеспечение

приемлемо высокого уровня надежности и технического риска при одновременном обеспечении минимально возможной суммарной стоимости и числа ремонтов в течение всего заданного срока эксплуатации мобильного канатного комплекса.

Перспективным направлением поддержания требуемых количественных показателей надежности в процессе эксплуатации мобильных канатных комплексов и предотвращения возможных аварийных ситуаций является непрерывная диагностика функционального состояния их ключевых узлов и механизмов. В [34, 47] для целей создания систем удаленной диагностики предложено использовать цифровые двойники мобильных канатных комплексов. На всех мобильных машинах, входящих в состав мобильной канатной дороги, предполагается устанавливать необходимые первичные средства замера информативных количественных параметров, характеризующих работу. Полученные данные по беспроводным каналам связи передаются на центральный бортовой компьютер информационно-управляющей подсистемы (рис. 5), которая управляет работой мобильной канатной дороги. Здесь полученные диагностические параметры обрабатываются с использованием комплекса заранее разрабатываемых методик сравнения с аналогичными «идеальными» параметрами цифрового двойника и делается вывод о степени соответствия текущего функционального состояния ключевых узлов и механизмов мобильной канатной дороги требованиям работоспособности.

6. Моделирование рабочих процессов в гидроприводе несущо-тяговой системы канатных комплексов

В предложенных в [10] перспективных конструкциях мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов в качестве основного типа привода механизмов несущо-тяговой системы рассматривается гидравлический привод вследствие его существенных преимуществ перед другими типами приводов технических устройств [48]. Гидропривод входит как гидравлическая под-

система в обобщенную структурную схему канатной системы [41] (рис. 5) и как функциональная подмодель в комплексную математическую модель мобильного канатного комплекса [5, 10, 24]. Как следствие, разработка научных основ проектирования и моделирования рабочих процессов в гидроприводе несущо-тяговой системы мобильного комплекса имеет существенное значение.

Этому вопросу было посвящено несколько законченных исследований [49-52]. В указанных работах рассматривались задачи моделирования рабочих гидродинамических процессов, протекающих в гидроприводах с частотно-дроссельным регулированием механизмов движения тяговых и несущо-тяговых канатов, на всех стадиях работы механизма движения – стадии разгона транспортлируемого груза, стадии установившегося (стационарного) движения с постоянной скоростью и стадии торможения при подходе к конечной точке останова. В основу математических моделей был положен подход, сформулированный ранее в БГУ им. акад. И.Г. Петровского и основанный на представлении гидросистем транспортно-технологических машин в виде структурно-функциональных схем специальной структуры [48, 53]. В качестве схемы, реализующей дроссельное регулирование, в [49, 51, 52] рассматривались возможные варианты исполнения гидравлической схемы при последовательной установке регулируемых дросселей относительно гидромотора (односторонняя установка одного дросселя и двухсторонняя установка двух дросселей с одинаковой и различной настройкой), а в [50] – при параллельной установке регулируемых дросселей относительно гидромотора. Были разработаны математические модели гидропривода и реализующие их компьютерные программы [15, 17]. Модели обеспечивают компьютерное моделирование во времени процессов изменения во времени таких основных технических характеристик гидропривода, как давления и объемные расходы рабочей жидкости в характерных точках по длине гидросистемы, перепад давления на гидромоторе и мгновенная мощность гидропривода, а также кинематических и силовых

параметров движения тяговых и несущих тяговых канатов (пройденного расстояния, линейной скорости и ускорения, требуемой мощности, преодолеваемых эксплуатационных нагрузок). Проведенные исследования показали, что комбинированное частотно-дроссельное регулирование гидропривода позволяет достаточно эффективно и гибко управлять работой канатной системы, обеспечивая необходимые скоростные параметры движения несущего тягового каната как на стадии разгона транспортируемого груза, так, что более важно, и на стадии торможения при подходе к конечной точке останова. Изменение частоты вращения выходного вала насоса нерегулируемого типа позволяет обеспечивать плавный останов даже без использования дополнительных внешних тормозных устройств.

7. Заключение

Результаты исследований, проводимых учеными Брянского государственного университета имени академика И.Г. Петровского в области мобильных канатных транспортно-логистических технологий на базе самоходных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости, подтверждают и научно обосновывают те практически значимые технико-экономические достоинства мобильных канатных дорог на основе канатных комплексов, которые позволяют рассматривать их в качестве перспективного вида оборудования для реализации современных транспортно-логистических технологий грузовых и пассажирских перевозок, а также для многоцелевого использования в разнообразных чрезвычайных ситуациях.

В настоящее время как в России, так и за рубежом отсутствуют мобильные машины и оборудование для практической реализации

задачи по использованию канатных технологий с надземным перемещением транспортируемых грузов, достаточно хорошо зарекомендовавших себя для решения транспортно-логистических проблем на труднодоступных территориях со сложным рельефом. Анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы позволяет сделать вывод, что первопричиной данной ситуации является отсутствие в настоящее время целостных научных подходов к выбору тактико-технических характеристик и проектированию, исследованию рабочих процессов и динамической нагруженности, риск-анализу мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Известные основанные на подходах технической механики и сопротивления материалов методики и рекомендации по расчету, в частности, кабельных кранов [54] или мобильных трелевочных канатных установок [9, 55] не могут обеспечить создание перспективных мобильных канатных дорог и комплексов вследствие значительных принципиальных различий в конструкции, условиях и режимах эксплуатации, принципах интеллектуального управления, учета влияния базового гусеничного или колесного шасси, процессов его взаимодействия с деформируемым опорным основанием и др. [4, 25].

Как следствие, для успешного создания современных образцов технологического оборудования для мобильных канатных дорог и систем на основе мобильных канатных комплексов, обладающих высокими техническими, экономическими и экологическими характеристиками, требуется создание научно обоснованной теории данного вида транспорта и разработанных на ее основе перспективных конкурентоспособных конструкций машин и оборудования отечественного производства.

Список литературы

1. Научный сайт БГУ имени академика И.Г. Петровского. Режим доступа: <https://nauka-brgu.ru/> (дата обращения 22.12.2020).
2. Научно-исследовательская лаборатория транспортно-логистических роботизи-

References

1. *Scientific site of the BSU named after Academician I.G. Petrovskii* [site]. Available at: <http://nauka-brgu.ru/> (In Russian)
2. *Research laboratory of transport and logistics robotic technologies and complexes of a safe urbanized environment* [site]. Availa-

рованных технологий и комплексов безопасной урбанизированной среды. Режим доступа: <https://brgu.ru/science/general-information/nauchnye-podrazdeleniya/nit-transportno-logisticheskie-robotizirovannye-tekhnologii/> (дата обращения 22.12.2020).

3. 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.

4. Короткий А.А., Лагереv А.В., Месхи Б.Ч., Лагереv 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.

5. Таричко В.И., Химич А.В. Комплексная математическая модель мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 4. С. 523-532.

6. Лагереv И.А., Таричко В.И. Разработка научных основ исследования и проектирования многоцелевых канатных систем нового поколения // Сб. мат. Нац. научно-практ. конф. с международным участием «Университет на пути к новому качеству науки и образования». Брянск: РИСО БГУ, 2020. С. 461-465.

7. Таричко В.И., Лагереv И.А. Моделирование рабочих процессов канатных транспортных систем нового поколения // Сб. мат. XIII Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020.

8. Кочнев Е.Д. Энциклопедия военных автомобилей 1769-2006. М.: За рулем, 2006. 640 с.

9. Beňo P., Krilek J., Kováč J., Kozak D., Fragassa C. The Analysis of the New Conception Transportation Cableway System Based on the Tractor Equipment. FME Transactions (2018) 46, 17-22. DOI:10.5937/fmet1801017B.

ble at: <https://brgu.ru/science/general-information/nauchnye-podrazdeleniya/nit-transportno-logisticheskie-robotizirovannye-tekhnologii/> (In Russian)

3. 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)

4. 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)

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

6. Lagerev I.A., Tarichko V.I. Development of scientific foundations for research and design of new generation multipurpose rope systems. *Sbornik materialov Natsionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Universitet na puti k novomu kachestvu nauki i obrazovaniya»*, Bryansk, RISO BГУ, 2020, pp. 461-465. (In Russian)

7. Tarichko V.I., Lagerev I.A. Simulation of working processes for new generation ropeway transport systems. *Sbornik materialov XIII Vseross. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov «Budushchee mashinostroeniya Rossii»*, Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2020. (In Russian)

8. Kochnev E.D. *Entsiklopediya voennykh avtomobiley 1769-2006* [Encyclopedia of Military Vehicles 1769-2006]. Moscow, OOO Knizhnoe izdatelstvo Za rulem, 2006. 640 p. (In Russian)

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

11. Пат. 200827 Рос. Федерация: МПК⁷ B61B 7/06. Самоходная концевая станция / Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «БГУ им. ак. И.Г. Петровского». – №2020117118; заявл. 12.05.2020; опубл. 12.11.2020, Бюл. № 32. 2 с.

12. Пат. 200206 Рос. Федерация: МПК⁷ F16G 11/06, B66B 7/06. Быстроразъемное устройство для соединения канатов мобильных канатных комплексов маятникового типа / Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «БГУ им. ак. И.Г. Петровского». – №2020121057; заявл. 17.06.2020; опубл. 13.10.2020, Бюл. № 29.

13. Пат. 165312 Рос. Федерация: МПК⁷ B66C 23/64. Выносная опора подъемно-транспортной машины / Лагерев И.А., Ковальский В.Ф., Толкачев Е.Н., Шатунова Е.А., Лагерев А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «БГУ им. ак. И.Г. Петровского». – №2016116467; заявл. 26.04.16; опубл. 10.10.2016, Бюл. 28.

14. Пат. 186456 Рос. Федерация: МПК⁷ B66C 23/78. Выносная опора подъемно-транспортной машины / Лагерев А.В., Лагерев И.А., Остроухов И.О.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «БГУ им. ак. И.Г. Петровского». – №2018136727; заявл. 17.10.18; опубл. 21.01.2019, Бюл. 3.

15. Таричко В.И., Лагерев А.В., Лагерев И.А. Моделирование частотно-регулируемого гидропривода мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса. - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610757. - Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 21.01.2020.

16. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Моделирование кинетики показателей надежности механизма движения канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса. - Свидетельство о государственной регистра-

9. Beňo P., Krilek J., Kováč J., Kozak D., Fragassa C. The Analysis of the New Conception Transportation Cableway System Based on the Tractor Equipment. *FME Transactions*, 2018, Vol.46, pp. 17-22. DOI:10.5937/fmet1801017B.

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 transport and transshipment rope complexes]. Bryansk, RISO BGU, 2020. 207 p. (In Russian)

11. Patent RU 200827, B61B 7/06. *Samokhodnaya kontsevaya stantsiya* [Self-propelled terminal station]. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Declared 12.05.2020. Published 12.11.2020. (In Russian)

12. Patent RU 200206, F16G 11/06, B66B 7/06. *Bystrorazemnoe ustroystvo dlya soedineniya kanatov mobilnykh kanatnykh kompleksov mayatnikovogo tipa* [Quick disconnect device for connecting ropes of mobile rope complexes of pendulum type]. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Declared 17.06.2020. Published 13.10.2020. (In Russian)

13. Patent RU 165312, B66C23/64. *Vynosnaya opora podemno-transportnoy mashiny* [Outrigger of lifting and transport machine]. Lagerev I.A., Kovalskiy V.F., Tolkachev E.N., Shatunova E.A., Lagerev A.V. Declared 26.04.2016. Published 10.10.2016. (In Russian) DOI: 10.5281/zenodo.1307480.

14. Patent RU 186456, B66C 23/78. *Vynosnaya opora mobilnoy gruzopodemnoy mashiny* [Outrigger of mobile lifting machine]. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Ostroukhov I.O. Declared 17.10.2018. Published 21.01.2019. (In Russian) DOI: 10.5281/zenodo.2550556.

15. Tarichko V.I., Lagerev A.V., Lagerev I.A. *Modelirovanie chastotno-reguliruemogo gidroprivoda mobilnogo transportno-peregruzochnogo kanatnogo kompleksa. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [Modeling a frequency-controlled hydraulic drive of a mobile transport and handling rope complex. The Cer-

ции программы для ЭВМ № 2020615868. - Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 03.06.2020.

17. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv И.А. Моделирование гидропривода мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса с частотно-дрессельным регулированием. - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020615888. - Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 03.06.2020.

18. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv И.А., Черных А.А. Моделирование режимов движения колесной мобильной транспортно-технологической машины. - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616786. - Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 22.06.2020.

19. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv И.А. Планирование стратегии ремонтов канатной системы мобильного канатного комплекса. - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664273. - Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 11.11.2020. Бюл. № 11.

20. Таричко В.И. Классификация подвесных канатных дорог с целью построения математических моделей // Сб. мат. Междунар. научно-техн. конф. молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности». Могилев: БРУ, 2019. С. 107.

21. Таричко В.И., Лагереv И.А. Концепция создания мобильных канатных дорог на базе специальных колесных шасси // Мат. Всеросс. научно-практ. конф. «Инновационное развитие подъемно-транспортной техники». Брянск: БГТУ, 2019. С. 84-87.

22. Таричко В.И., Лагереv И.А. Концепция применения ленточных конвейеров для загрузки мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Мат. Всеросс. научно-практ. конф. «Инновационное развитие подъемно-транспортной техники». Брянск: БГТУ, 2020. С. 96-99.

23. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н. Математическая модель конвейера с подвесной лентой, распределенным приводом и вертикально замкнутой трассой // Вестник Брянского государственного технического университета. 2014. № 3. С. 44-52.

tificate on official registration of the computer program]. No. 2020610757, 2020. (In Russian)

16. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. *Modelirovanie kinetiki pokazateley nadezhnosti mekhanizma dvizheniya kanatnoy sistemy mobilnogo transportno-peregruzochnogo kanatnogo kompleksa* [Modeling the kinetics of reliability indicators of the mechanism of movement of the rope system of a mobile transport and reloading rope complex]. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2020615868, 2020. (In Russian)

17. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. *Modelirovanie gidroprivoda mobilnogo transportno-peregruzochnogo kanatnogo kompleksa s chastotno-drosselnym regulirovaniem* [Simulation of a hydraulic drive of a mobile transport and reloading rope complex with frequency-throttle control]. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2020615888, 2020. (In Russian)

18. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A., Chernykh A.A. *Modelirovanie rezhimov dvizheniya kolesnoy mobilnoy transportno-tekhnologicheskoy mashiny* [Modeling the modes of movement of a wheeled mobile transport and technological machine]. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2020616786, 2020. (In Russian)

19. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. *Planirovanie strategii remontov kanatnoy sistemy mobilnogo kanatnogo kompleksa* [Planning a strategy for repairs of the ropeway system of a mobile ropeway complex]. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2020664273, 2020. (In Russian)

20. Tarichko V.I. Classification of aerial ropeways for the purpose of constructing mathematical models. *Sbornik materialov Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. molodykh uchenykh «Novye materialy, oborudovanie i tekhnologii v promyshlennosti»*, Mogilev, BRU, 2019, p. 107. (In Russian)

21. Tarichko V.I., Lagerev I.A. The concept of creating mobile ropeways based on special wheeled chassis. *Materialy Vseross. nauchno-prakt. konf. «Innovatsionnoe razvitie podemno-transportnoy tekhniki»*, Bryansk, BGTU, 2019, pp. 84-87. (In Russian)

24. Таричко В.И., Лагерев И.А. Комплексная математическая модель для исследования рабочих процессов мобильных канатных дорог // Сб. мат. XII Всеросс. конф. молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. С. 770-774.

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

26. ГОСТ Р 52748-2007. Дороги автомобильные общего пользования. Нормативные нагрузки, расчетные схемы нагружения и габариты приближения. Введ. 2008-01-01. М.: Стандартинформ, 2008. 16 с.

27. ГОСТ 9238-2013. Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2014. 211 с.

28. Грузовые авиаперевозки. Характеристики грузовых отсеков воздушных судов. Режим доступа: <http://www.caravan.msk.ru/load.htm#b777200> (дата обращения 22.12.2020).

29. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Компонировка технологического оборудования на базовом шасси мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №3. С. 388-403. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-388-403.

30. Таричко В.И., Лагерев И.А. Сравнение вариантов размещения оборудования мобильного канатного комплекса на шасси грузового автомобиля // Сб. мат. Междунар. научно-техн. конф. «Наземные транспортно-технологические комплексы и средства». Тюмень: ТИУ, 2020. С. 240-244.

31. Таричко В.И., Лагерев И.А., Черных А.А. Компьютерное моделирование режимов движения мобильной транспортно-технологической машины // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №1. С. 136-143.

32. Таричко В.И., Лагерев И.А. Расчет-

22. Tarichko V.I., Lagerev I.A. *Kontseptsiya primeneniya lentochnykh konveyerov dlya zagruzki mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [The concept of using belt conveyors for loading mobile transport and reloading rope complexes]. *Materialy Vseross. nauchno-prakt. konf. «Innovatsionnoe razvitie podemno-transportnoy tekhniki»*, Bryansk, BGTU, 2020, pp. 96-99. (In Russian)

23. Lagerev A.V., Tolkachev E.N. Mathematical model of a special conveyor with suspended belt and distributed drive. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, No.3, pp. 44-52. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302231> (In Russian)

24. Tarichko V.I., Lagerev I.A. Comprehensive mathematical model for studying the work processes of mobile ropeways. *Sbornik materialov XII Vseross. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov «Budushchee mashinostroeniya Rossii»*, Moscow, MGTU im. N.E. Bauman, 2019, pp. 770-774. (In Russian)

25. Lagerev I.A., Lagerev A.V. *Sovremennaya teoriya manipulatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselovykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov. Konstruktsiya i usloviya ekspluatatsii* [Modern theory of manipulation systems of mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes. Design and operating conditions]. Bryansk, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, 2018. 190 p. DOI: 10.5281/zenodo.1294622 (In Russian)

26. GOST R 52748-2007 Automobile roads of the general using. Standard loads, loading systems and clearance approaches. Moscow, Standartinform, 2008. 16 p. (In Russian)

27. GOST 9238-2013 Construction and rolling stock clearance diagrams. Moscow, Standartinform, 2014. 211 p. (In Russian)

28. *Air cargo transportation. Characteristics of aircraft cargo compartment* [site]. Available at: <http://www.caravan.msk.ru/load.htm#b777200>.

29. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Placement of technological equipment on the basic chassis of the mobile transportation

но-экспериментальные исследования динамики механической трансмиссии базовой станции мобильной канатной дороги // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 318-326.

33. Боровков А. Новая парадигма. Цифровые двойники – стратегия инновационного прорыва в ОПК // Новый оборонный заказ. Стратегии. 2020. № 4. С. 34-38.

34. Лагереv И.А., Таричко В.И., Панфилов А.В. Методика создания и применения цифрового двойника мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Advanced Engineering Research. 2020. Т. 20. №3. С. 243-251. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-243-251.

35. Лагереv И.А., Таричко В.И., Солдатченков С.П., Игнатов Д.А. Создание экспериментального макета мобильной канатной дороги с использованием 3D-печати // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 221-230.

36. Александров М.П. Грузоподъемные машины. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана – Высшая школа, 2000. 552 с.

37. Лагереv А.В., Таричко В.И., Солдатченков С.П. Обеспечение общей устойчивости базовых колесных станций мобильных канатных дорог // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 210-220. DOI:10.22281/2413-9920-2019-05-02-210-220.

38. Лагереv И.А., Остроухов И.О., Химич А.В. Компьютерное моделирование процесса потери общей устойчивости мобильной машины, оснащенной стреловой манипуляционной системой // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №1. С. 83-94.

39. Težak S, Toš Z. Reliability analysis of operation for cableways by FTA (fault tree analysis) method // Promet-Traffic & Transportation. 2000. Vol. 22. P. 163-173. DOI: 10.7307/ptt.v22i3.272.

40. Короткий А.А., Лагереv А.В., Месхи Б.Ч., Лагереv И.А., Панфилов А.В. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии

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)

30. Tarichko V.I., Lagerev I.A. *Sravnenie variantov razmeshcheniya oborudovaniya mobilnogo kanatnogo kompleksa na shassi gruzovogo avtomobilya* [Comparison of options for placing equipment of a mobile ropeway complex on a truck chassis]. *Sbornik materialov Mezhdunar. nauchno-tekh. konf. «Nazemnye transportno-tehnologicheskie komplekсы i sredstva»*. Tyumen, TIU, 2020, pp. 240-244. (In Russian)

31. Tarichko V.I., Lagerev I.A., Chernykh A.A. Motion modes simulation of a mobile transport and technological machine. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.1, pp. 136-143. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-136-143 (In Russian)

32. Tarichko V.I., Lagerev I.A. Dynamics simulation and experimental analysis of a mobile cable car base station's mechanical transmissions. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 318-326. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-318-326 (In Russian)

33. Borovkov A. New paradigm. Digital twins - a strategy for an innovative breakthrough in the defense industry. *Novyy oboronnyy zakaz. Strategii*, 2020, No.4, pp. 34-38. (In Russian)

34. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Panfilov A.V. Methods of creating and using a digital twin of a mobile transport and transshipment rope complex. *Advanced Engineering Research*, 2020, Vol.20, No.3, pp. 243-251. DOI: 10.23947/2687-1653-2020-20-3-243-251. (In Russian)

35. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P., Ignatov D.A. The experimental model creation of a mobile ropeway by 3D-printing. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 221-230. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-221-230 (In Russian)

канатного метро. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. 344 с. DOI: 10.5281/zenodo.1311913.

41. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv И.А. Вероятностно-временной анализ кинетики показателей надежности на стадии проектирования канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 256-275. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275.

42. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Simulation of the change in the reliability of rope system motion mechanism in mobile ropeway complex // Lecture Notes Mechanical Engineering. ICIE 2020: Proceedings of the 6th Int. Conf. on Industrial Engineering. 2020. Vol. II. P. 745-754. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_86.

43. Лагерева Е.А., Лагереv А.В., Лагереv И.А. Вероятностная оценка надежности гидропривода кранов-манипуляторов путем имитационного моделирования потока отказов элементов // Приводы и компоненты машин. 2012. № 2-3. С. 2-5.

44. ГОСТ Р 54124-2010 Безопасность машин и оборудования. Оценка риска. Дата введения 2012-06-01. М.: Стандартинформ, 2013.

45. Лагереv А.В., Лагерева Е.А. Оптимальное управление техническим риском при проектировании гидропривода грузоподъемных машин // Известия МГТУ «МАМИ». 2015. Т.1. № 3 (25). С. 60-66.

46. 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.

47. Таричко В.И., Черных А.А. Удаленная диагностика канатной транспортной системы с использованием нейросетей // Сб. мат. Междунар. научно-техн. конф. «Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях». Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. С. 381-384.

36. Aleksandrov M.P. *Gruzopodemnyye mashiny* [Lifting-transport machines]. Moscow, MGTU imeni N.E. Bauman, 2000. 552 p. (In Russian)

37. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P. General stability of a base vehicle of a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 210-220. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-209-220 (In Russian)

38. Lagerev I.A., Ostroukhov I.O., Khimitch A.V. Computer simulation of the general stability loss of the mobile transport and technological machines equipped with boom lift manipulator. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.1, pp. 83-94. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-01-83-94 (In Russian)

39. Težak S., Toš Z. Reliability analysis of operation for cableways by FTA (fault tree analysis) method. *Promet-Traffic & Transportation*, 2000, Vol.22, pp. 163-173. DOI: 10.7307/ptt.v22i3.272.

40. 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)

41. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Probability-temporal analysis of reliability indicators kinetics at the stage of designing a rope system of a mobile transport and reloading ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 256-275. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-256-275 (In Russian)

42. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Simulation of the change in the reliability of rope system motion mechanism in mobile ropeway complex. *Lecture Notes Mechanical Engineering. ICIE 2020: Proceedings of the 6th Int. Conf. on Industrial Engineering*, 2020, Vol.II, pp. 745-754. DOI: 10.1007/978-3-030-

48. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Современная теория манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Исследование рабочих процессов и проектирование элементов гидропривода. Брянск: РИО БГУ, 2019. 201 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3268490>.

49. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Моделирование режимов работы гидроприводов с частотно-дрессельным регулированием мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С. 462-480. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480.

50. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Работа гидроприводов с частотно-дрессельным регулированием мобильных канатных комплексов при последовательной установке дресселей // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №1. С. 73-92. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-73-92.

51. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Modeling of hydrodynamic and kinematic processes during the operation of a mobile cargo rope complex // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol.1753. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012022.

52. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Моделирование гидродинамических и кинематических процессов при работе мобильного грузового комплекса // Сб. мат. VII Междунар. научно-практ. конф. «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020». С.-Пб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. С. 349-353.

53. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Моделирование рабочих процессов в дрессельно-регулируемом гидроприводе манипуляционных систем мобильных машин при раздельном движении звеньев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. №4. С. 355-379. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379>.

54. Дукельский А.И. Подвесные канат-

54817-9_86.

43. Lagereva E.A., Lagerev A.V., Lagerev I.A. Probabilistic estimation of reliability of the hydraulic drive of crane-manipulators simulation-based flow of element failures. *Pryvody i komponenty mashin*, 2012, No.2-3, pp. 2-5. (In Russian)

44. GOST R 54124-2010 Safety of machinery and equipment. Risk assessment. Moscow, Standartinform, 2015. (In Russian)

45. Lagerev A.V., Lagereva E.A. Optimal management of technical risk the design of the hydraulic lifting machines drive. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2015, Vol.1, No.3, pp. 60-66. (In Russian)

46. 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)

47. Tarichko V.I., Chernykh A.A. Remote diagnostics of the ropeway transport system using neural networks. *Sbornik materialov Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. «Energoresursosberegayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoy i stroitelnoy otraslyakh»*, Belgorod, BGTU im. V.G. Shukhova, 2020, pp. 381-384. (In Russian)

48. Lagerev A.V., Lagerev I.A. *Sovremennaya teoriya manipulatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselovykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov. Issledovanie rabochikh protsessov i proektirovanie elementov gidroprivoda* [Modern theory of manipulation systems of mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes. Research of working processes and design of hydraulic drive elements]. Bryansk, RISO BGU, 2019. 201 p. DOI: 10.5281/zenodo.3268490 (In Russian)

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

ные дороги и кабельные краны. М.-Л.: Машиностроение, 1966. 484 с.

55. Передвижные и самоходные канатные установки [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://lektsii.org/1-88050.html> (Дата обращения: 20.11.2020).

† 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480 (In Russian)

† 50. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. The operation of hydraulic drives with frequency-throttle regulation for mobile rope complexes with the consistent installation of throttles. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.1, pp. 73-92. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-73-92 (In Russian)

† 51. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Modeling of hydrodynamic and kinematic processes during the operation of a mobile cargo rope complex. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, Vol.1753, 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012022.

† 52. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Modeling of hydrodynamic and kinematic processes during the operation of a mobile cargo rope complex. *Sbornik materialov VII Mezhdunar. nauchno-prakt. konf. «Innovatsii i perspektivy razvitiya gornogo mashinostroeniya i elektromekhaniki: IPDME-2020»*, Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet, 2020, pp. 349-353. (In Russian)

† 53. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Modeling of working processes in the throttle-adjustable hydraulic drive of manipulation systems with separate movement of links during operation of mobile machines. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No.4, pp. 355-379. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379 (In Russian)

† 54. Dukelskiy A.I. *Podvesnye kanatnye dorogi i kabelnye krany* [Overhead cableways and cable cranes]. Moscow-Leningrad, Mashinostroenie, 1966. 484 p. (In Russian)

† 55. *Mobile and self-propelled rope installations* [site]. Available: <https://lektsii.org/1-88050.html>. (In Russian)