



Научно-технический вестник

БРЯНСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

*Nauchno-Tekhnicheskiy Vestnik
Bryanskogo Gosudarstvennogo
Universiteta*

Б Р Я Н С К

2022(1)

ISSN 2413-9920

**Научно-технический
ВЕСТНИК
Брянского
государственного
университета**

**№ 1
2022**

Технические науки

Nauchno-tehnicheskij
VESTNIK
Bryanskogo
gosudarstvennogo
universiteta

**Scientific and Technical Journal of
Bryansk State University**

№ 1
2022

Engineering Science

ББК 74.580.4

Н-34

Научно-технический вестник Брянского государственного университета. № 1 (2022). Брянск: РИСО БГУ, 2022. – Точка доступа: <http://ntv-brgu.ru>
Размещено на официальном сайте журнала: 25.03.2022

Распоряжением Минобрнауки России от 12 февраля 2019 г. № 21-р сетевое издание «Научно-технический вестник Брянского государственного университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим специальностям научных работников:

05.02.02 – Машиноведение, системы приводов и детали машин (технические науки);

05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении (технические науки);

05.05.03 – Колесные и гусеничные машины (технические науки);

05.05.04 – Дорожные, строительные и подъемно-транспортные машины (технические науки)

Председатель Редакционного совета БГУ им. акад. И.Г. Петровского:

А.В. Антюхов – доктор филологических наук, профессор, ректор Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия).

Главный редактор сетевого издания:

А.В. Лагерев – доктор технических наук, заместитель директора НИИ фундаментальных и прикладных исследований Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия)

Ответственный секретарь сетевого издания:

И.В. Мельников – кандидат биологических наук, начальник Редакционно-издательского отдела Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия).

Редакционная коллегия сетевого издания:

Д.В. Артамонов – доктор технических наук, первый проректор Пензенского государственного университета (г. Пенза, Россия);

Н.И. Баурова – доктор технических наук, декан факультета дорожных и технологических машин Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (г. Москва, Россия);

В.В. Беляков – доктор технических наук, начальник управления научно-исследовательских и инновационных работ Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород, Россия);

А.В. Вершинский – доктор технических наук, профессор кафедры подъемно-транспортных систем Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (г. Москва, Россия);

А.А. Короткий – доктор технических наук, заведующий кафедрой транспортных систем и логистики Донского государственного технического университета (г. Ростов-на-Дону, Россия);

А.В. Лагерев – доктор технических наук, заместитель директора НИИ фундаментальных и прикладных исследований Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия);

И.А. Лагерев – доктор технических наук, проректор по инновационной работе Брянского государственного университета им. акад. И.Г. Петровского (г. Брянск, Россия);

В.М. Пашкевич – доктор технических наук, проректор по научной работе Белорусско-Российского университета (г. Могилев, Беларусь);

И.А. Полянин – доктор технических наук, профессор кафедры транспортно-технологических машин Поволжского государственного технологического университета (г. Йошкар-Ола, Россия);

А.В. Рыбаков – доктор технических наук, начальник лаборатории информационного обеспечения населения и технологий информационной поддержки Академии гражданской защиты МЧС России (г. Химки, Россия);

Н.Г. Ярушкина – доктор технических наук, первый проректор-проректор по научной работе Ульяновского государственного технического университета (г. Ульяновск, Россия).

Editorial Council Chairman of Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University:

A.V. Antyukhov – Doctor of Philological Sciences, Professor, Rector at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia).

Chief editor:

A.V. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Vice director of Institute of basic and applied research at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia).

Executive secretary:

I.V. Melnikov – Candidate of Biological Sciences, Chief of Editorial-publishing Department at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia).

Editorial Board:

D.V. Artamonov – Doctor of Technical Sciences, first Vice rector at Penza State University (Penza, Russia);

N.I. Baurova – Doctor of Technical Sciences, Dean of faculty of road and technological machines at Moscow automobile and road construction state technical University (Moscow, Russia);

V.V. Belyakov – Doctor of Technical Sciences, Head of research and innovation Department at Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev (Nizhny Novgorod, Russia);

A.V. Vershinsky - Doctor of Technical Sciences, Professor of chair of Lifting and transport system at Moscow State Technical University named N.E. Bauman (Moscow, Russia);

A.A. Korotky - Doctor of Technical Sciences, Head of chair of transport systems and logistics at Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia);

A.V. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Vice director of Institute of basic and applied research at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia);

I.A. Lagerev – Doctor of Technical Sciences, Vice rector at Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russia);

V.M. Pashkevich - Doctor of Technical Sciences, Vice rector at Belarusian-Russian University (Mogilev, Belarus Republic);

I.A. Polyenin - Doctor of Technical Sciences, Professor of chair of transport and technological machines at Povolzhskiy State Technical University (Yoshkar-Ola, Russia);

A.V. Rybakov - Doctor of Technical Sciences, Head of Laboratory of information technologies and providing the population at Academy of civil defence EMERCOM of Russia (Khimki, Russia);

N.G. Yarushkina - Doctor of Technical Sciences, first Vice rector at Ulyanovsk State Technical University (Ulyanovsk, Russia).

Электронный журнал «Научно-технический вестник Брянского государственного университета» зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации: Эл № ФС77-62798 от 18 августа 2015 г.

16+

Ответственность за точность фактологического материала, используемого в статьях, несут авторы.

© Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2022
© 2022 Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta



The Journal and its metadata are licensed under CC BY-SA

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



Машиностроение и машиноведение

Транспортное, горное и строительное машиностроение

Статьи, опубликованные в этом разделе, соответствуют требованиям Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук, на соискание ученой степени кандидата наук по специальностям научных работников 05.02.02; 05.02.11; 05.05.03; 05.05.04 (Распоряжение Минобрнауки России от 12 февраля 2019 г. № 21-р)

Степченко Т.А., Бабич О.В. (Брянск, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-07-26

Результаты научных исследований Брянского государственного университета в 2021 году в сфере проектирования и моделирования рабочих процессов в мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексах 7

Гончаров К.А. (Брянск, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-27-37

Система теплового диагностирования ленточных конвейеров 27

Лагерев А.В., Лагерев И.А. (Брянск, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-38-60

Общий подход к созданию цифровых двойников мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов 38

Сафронов Е.В., Носко А.Л., Шарифуллин И.А., Гуськова А.С. (Москва,

Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-61-69

Методика оценки концентрации мелкодисперсных частиц PM10 при работе центробежных фрикционных роликов 61

Химич А.В., Артемова А.А., Перминова Д.И., Лагерев И.А. (Брянск, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-70-75

Исследование нагруженности линейно-протяженных конструкций при использовании обжимных устройств 70

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Гулахмадов А.А. (Урумчи, КНР)

DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-76-85

Анализ климатических переменных в верховьях бассейна реки Амударья в Таджикистане 76

CONTENT

ENGINEERING SCIENCE

**Machinery Building and Theoretical Engineering
Transport, Mining and Construction Machinery**

The articles published in this section comply with the requirements of the List of peer-reviewed scientific publications, in which the main scientific results of dissertations for the degree of Doctor of Science, for the degree of Candidate of Science in the specialties of scientific workers 05.02.02; 05.02.11; 05.05.03; 05.05.04

(Order of the Ministry of Education and Science of Russia of February 12, 2019 No. 21-p)

Stepchenko T.A., Babich O.V. (Bryansk, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-07-26

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 ... 7

Goncharov K.A. (Bryansk, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-27-37

Thermal diagnosis system of belt conveyors 27

Lagerev A.V., Lagerev I.A. (Bryansk, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-38-60

A general approach to the creation of digital twins of mobile ropeways based on mobile transport and reloading rope units 38

Safronov E.V., Nosko A.L., Sharifullin I.A., Guskova A.S. (Moscow, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-61-69

Method of estimation of PM10 fine particle concentration during operation of centrifugal friction rollers 61

Khimich A.V., Artyomova A.A., Perminova D.I., Lagerev I.A. (Bryansk, Russian Federation)

DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-70-75

Load study of the linear-extended structures when using crimping devices 70

EARTH SCIENCE

Gulakhmadov A.A. (Urumqi, PRC)

DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-01-76-85

Analysis of climate variables in the upper Amu Darya river basin in Tajikistan 76

УДК (UDC) 608.4

РЕЗУЛЬТАТЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БРЯНСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА В 2021 ГОДУ В СФЕРЕ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В
МОБИЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ КАНАТНЫХ КОМПЛЕКСАХTHE 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 COMPLEXESСтепченко 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: 20.01.2022
Дата публикации: 25.03.2022

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 overloading 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: 20.01.2022
Date of publication: 25.03.2022

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 2021 году учеными Брянского государственного университета имени академика И.Г. Петровского были продолжены многолетние научные исследования в приоритет-

ном направлении – в области разработки перспективных отечественных образцов конструкций мобильных транспортно-перегрузочных канатных систем и комплексов, других мобильных наземных грузоподъемных средств, обладающих высокими показателя-

ми производительности, надежности, экономичности, безопасности и экологичности, а также в области создания научно обоснованных методов их проектирования и компьютерного моделирования рабочих процессов при дальнейшей эксплуатации. Указанные исследования проводились в соответствии с планами развития научной деятельности университета [1] и научно-исследовательской лаборатории «Транспортно-логистические роботизированные технологии и комплексы безопасной урбанизированной среды» [2] при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук (проект № МД-422.2020.8).

В настоящее время мобильные транспортно-перегрузочные канатные системы и комплексы рассматриваются в качестве перспективного вида подъемно-транспортной техники [3]. Такое внимание к данному типу транспортного оборудования обусловлено тем, что мобильные канатные комплексы, с помощью которых возможно оперативное формирование мобильных подвесных канатных дорог, обеспечивают проведение погрузочно-разгрузочных, транспортных и перегрузочно-переправочных операций в заранее не обустроенных или труднодоступных местностях со сложным профилем рельефа. Высокая мобильность данного типа грузových канатных транспортных систем, которая разительно отличает их от традиционных наземных средств, объясняется их размещением на специальных многоосных специальных колесных или гусеничных шасси высокой грузоподъемности и проходимости.

Следует также отметить, что такие мобильные канатные дороги имеют хорошие перспективы для их использования при проведении спасательных и восстановительных работ в процессе ликвидации разрушительных последствий природных и техногенных катастроф. Наличие критических разрушений жилых и производственных зданий и наземной транспортной системы резко усложняет использование традиционных транспортных средств, ориентированных на наземное размещение. Канатные дороги лишены указанного недостатка, так как ис-

пользуют принцип надземного перемещения грузов по кратчайшему пути без ограничения со стороны уцелевшей наземной застройки и образовавшихся завалов. Расположение необходимого технологического оборудования и канатной системы на самоходных установках высокой проходимости и грузоподъемности позволяет им автономно перемещаться к местам катастроф и быстро включаться в работу. Кроме того, повышенная мобильность позволяет при необходимости достаточно быстро менять расположение трассы канатной дороги по мере ликвидации последствий катастрофы [4].

В области разработки перспективных отечественных образцов конструкций мобильных транспортно-перегрузочных канатных систем и комплексов, других мобильных наземных грузоподъемных средств фундаментальные и прикладные исследования ученых 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 [5, 6].

Новым перспективным направлением исследований специалистов НИЛ «Транспортно-логистические роботизированные технологии и комплексы безопасной урбанизированной среды», которое планируется развивать в ближайшие годы, будет являться разработка цифровых двойников мобильных транспортно-перегрузочных канатных систем и комплексов. Указанные исследования были поддержаны Российским научным фондом в конкурсе 2021 году (проект № 22-29-00798 «Создание научных основ разработки цифровых двойников мобильных канатных транспортно-перегрузочных систем для работы в зонах чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера»). Работы в этом направлении были начаты еще в предыдущие годы [7] и выполнялись также в 2021 году [8, 9].

Результаты выполненных в 2021 году исследований ученых БГУ имени академика И.Г. Петровского были обобщены в монографии [10] и учебном пособии [11]. Представленные в [10] результаты оригинальных

исследований в сфере компьютерного моделирования ряда рабочих процессов, протекающих при эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов на базе автономных самоходных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости, являются логическим продолжением исследований авторского коллектива, ранее изложенных в монографии [12]. Были рассмотрены вопросы построения математических моделей и их компьютерной реализации применительно к анализу гидродинамических процессов в гидроприводе несущих канатных систем, а также анализ напряженно-деформированного состояния ответственных элементов металлоконструкции самоходных шасси. Для реализации задач компьютерного моделирования исследованных рабочих процессов были созданы и защищены как объекты интеллектуальной деятельности, правообладателем которых является БГУ им. акад. И.Г. Петровского, вычислительные программы для ЭВМ [13-17].

Исследования в области мобильных канатных транспортно-логистических технологий на базе самоходных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости, успешно проводимые в Брянском государственном университете имени академика И.Г. Петровского, представляют интерес как для отечественных, так и зарубежных ученых и специалистов производства. Это подтверждается публикацией результатов рассмотренных выше исследований в иностранных научных журналах, индексируемых в авторитетных наукометрических базах Scopus и Web of Science [18 - 23]. В целях повышения доступности и качества зарубежных публикаций также были проанализированы возможные меры по согласованию русскоязычных и англоязычных текстов, корректному использованию необходимой научно-технической терминологии [24].

Далее более подробно рассмотрены публикации, содержащие обладающие научной новизной и практической значимостью результаты выполненных в 2021 году научных исследований, по основным направлениям деятельности в области мобильных канатных транспортных и грузоподъемных машин.

2. Проектирование основного технологического оборудования и базовых самоходных шасси мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов

Одной из задач, решаемых на стадии проектирования мобильных канатных комплексов, является разработка новых вариантов конструктивного исполнения основного технологического оборудования и его размещения на несущей раме базовых самоходных шасси. Было предложено несколько таких вариантов, на которые БГУ имени академика И.Г. Петровского получены патенты Российской Федерации [25 - 27]. Возможно также размещение основного технологического оборудования не на раме шасси, а на тяжелых буксируемых прицепах или полуприцепах [28].

Предложенная в [25] самоходная концевая станция содержит концевую опору с расположенным на ней канатным шкивом с приводным и натяжным механизмами, огибающий канатный шкив движущийся замкнутый натянутый несущий канат с прицепными устройствами для подвески транспортируемых грузов и механизм перевода концевой опоры из транспортного положения в рабочее положение (рис. 1, а). Концевая опора и анкерные устройства закреплены на опорной пластине Z-образной поворотной платформы, имеющей возможность поворота в продольной вертикальной плоскости мобильного шасси относительно установленного в концевой части несущей рамы цилиндрического шарнира, продольная ось которого перпендикулярна продольной оси мобильного шасси, а концевая опора имеет возможность поворота в вертикальной плоскости относительно опорной пластины. Такая конструкция позволяет разгрузить надрамную конструкцию и несущую раму от воздействия значительных по величине опорных реакций, возникающих в узле крепления концевой опоры в процессе эксплуатации, и снизить вследствие этого ее металлоемкость. Это также повышает эксплуатационную надежность несущей рамы.

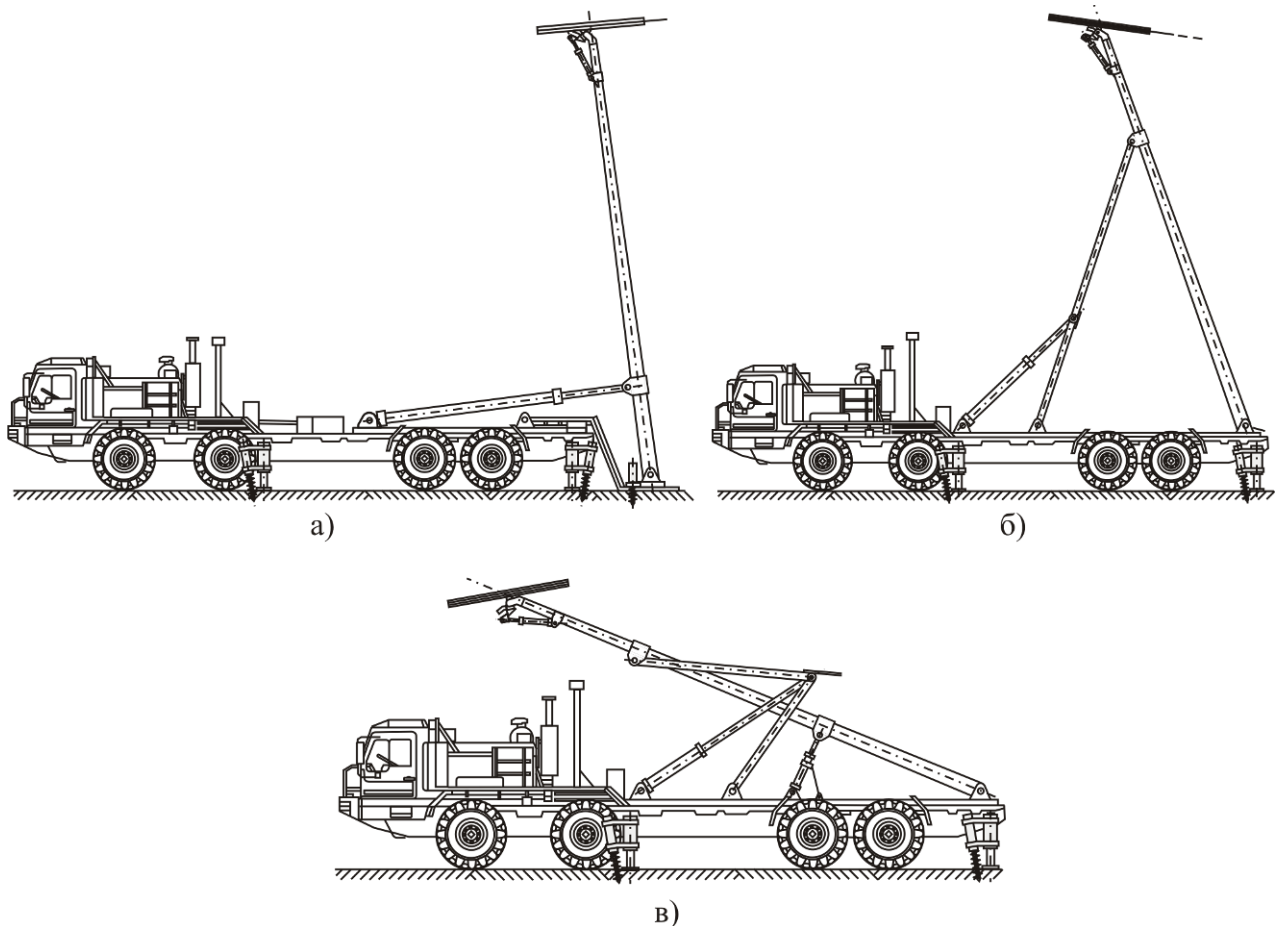


Рис. 1. Новые конструктивные варианты размещения основного технологического оборудования подвесных канатных дорог на несущей раме базового колесного шасси: а – вариант размещения концевой опоры на поворотной платформе [25]; б – вариант установки концевой опоры с помощью шарнирно-сочлененной складывающейся штанги [26]; в – вариант установки концевой опоры в два этапа с помощью дополнительного гидроцилиндра [27]

В конструкции самоходной концевой станции, предложенной в [26], концевая опора удерживается в рабочем положении складывающейся штангой, которая одним своим концом крепится к концевой опоре, другим – к надрамной конструкции мобильного шасси (рис. 1, б). Штанга состоит из двух соединенных цилиндрическим шарниром стержней разной длины, имеющих возможность относительного поворота в вертикальной плоскости, причем цилиндрический шарнир закреплен на конце штока гидроцилиндра для подъема концевой опоры, совершающего возвратно-поступательное перемещение. Такая конструкция позволяет снизить массо-габаритные характеристики подъемного гидроцилиндра за счет уменьшения его необходимой длины и хода штока,

а также освободить подъемный гидроцилиндр от дополнительной функции по удержанию концевой опоры в требуемом рабочем положении в процессе эксплуатации мобильной канатной дороги.

В конструкции самоходной концевой станции, предложенной в [27], в состав механизма подъема концевой опоры в виде шарнирно сочлененной складывающейся штанги дополнительно включен вспомогательный гидроцилиндр предварительного подъема концевой опоры (рис. 1, в). Такое техническое решение позволяет снизить массо-габаритные характеристики основного подъемного гидроцилиндра и потребную мощность насоса гидросистемы за счет установки вспомогательного гидроцилиндра предварительного подъема концевой опоры

из исходного транспортного положения, а также за счет снижения нагруженности несущей рамы самоходного мобильного шасси в процессе установки концевой опоры в рабочее положение вследствие снижения максимального усилия на штоке основного подъемного гидроцилиндра и, следовательно, снижения величины опорных реакций и напряжений, возникающих в металлоконструкции несущей рамы шасси.

Проектный анализ условий размещения концевых опор, конструкция которых была разработана в патентах [25 - 27], содержится в работах [29 - 32]. Разработанные в этих исследованиях математические модели компоновки основного технологического оборудования на несущем шасси самоходных колесных шасси реализованы в компьютерных программах [13 - 17], на которые в Роспатенте России получены свидетельства о государственной регистрации.

В [30] представлена классификация самоходных концевых станций мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов на основе ряда базовых конструктивных признаков. В их число были включены такие признаки, как расположение ключевого элемента основного технологического оборудования – концевой опоры канатной системы – на колесном шасси и типа ее фиксации в рабочем положении во время эксплуатации мобильной канатной дороги. В качестве перспективных вариантов конструктивного исполнения мобильных транспортно-технологических канатных комплексов были рассмотрены новые [25 - 27] и ранее предложенный [33] варианты с концевым, центральным и выносным расположением концевой опоры, с гидравлическим, канатным, канатно-гидравлическим и штанговыми типами фиксации концевой опоры в рабочем положении, с установкой концевой опоры в рабочее положение непосредственно подъемным гидроцилиндром, с помощью складывающейся штанги и двухэтапным подъемом [12]. Дано краткое описание конструкций и принципа работы большого числа модификаций самоходных концевых станций различных перечисленных вариантов конструктивного исполнения мобильных

канатных комплексов при подготовке их к эксплуатации и во время самой эксплуатации. На основе проведенного сравнительного анализа рассмотренных вариантов мобильных канатных комплексов, исходя из учета их основных конструктивных и технико-экономических характеристик, были сформулированы как преимущества, так и недостатки разных вариантов конструктивного исполнения.

Важной задачей, которую необходимо решить при компоновке технологического оборудования, в первую очередь, концевой опоры для любого варианта конструктивного исполнения мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса, является обеспечение в транспортном положении соблюдение нормативного габарита приближения по высоте с целью безопасного проезда под мостовыми сооружениями и путепроводами при движении самоходного шасси по автомобильным дорогам общего пользования к месту дислокации. Нормативный габарит обеспечивается, если вертикальная координата наиболее высокой точки основного технологического оборудования на базовом шасси в транспортном положении (вертикальный габарит) H_{mc} не превышает нормативный габарит приближения по высоте с учетом требуемых зазоров $[H] = 4$ м (регламентируется ГОСТ Р 52748-2007).

В работах [29, 32] рассмотрены вопросы компоновки механизма установки и фиксации концевой опоры с помощью складывающейся штанги, состоящей из двух шарнирно-сочлененных звеньев. В [32] рассмотрен вариант конструктивного исполнения, предусматривающий концевую установку концевой опоры на несущей раме самоходного шасси (рис. 1, б). В [29] рассмотрен альтернативный вариант конструктивного исполнения, предусматривающий установку концевой опоры на поворотной платформе, шарнирно закрепленной на несущей раме самоходного шасси (рис. 2). Для обоих вариантов дано описание соответствующих математических моделей, обеспечивающих требуемый нормативный вертикальный габарит самоходной базовой станции мобильной канатной дороги с целью ее безопасного

самостоятельного перемещения к месту развешивания канатной дороги по автомобильным дорогам общего назначения. Анализ разработанных математических моделей позволил доказать возможность разработки такой компоновки оборудования базовой станции в транспортном положении, которая бы позволяла ее самостоятельное перемещение по автомобильным дорогам общего назначения, причем при этом концевая опора имеет практически значимую длину. Например, 6-осные самоходные шасси могут укомплектовываться концевыми опорами длиной порядка 18 м, что позволяет в рабочем положении концевой опоры поднимать канатный шкив на высоту порядка 20 м, обеспечивая возможность транспортирования грузов на значительное расстояние исходя из естественного провисания несущего каната под нагрузкой и собственным погонным весом и разности высотных отметок установки сопряженных концевых базовых станций. Максимально возможная длина концевой опоры не зависит от конструктивных размеров верхней и нижней частей складывающейся штанги и ее присоединительных размеров, а лимитируется, главным образом, продольной длиной самоходного шасси. Таким образом, использование шасси с большим количеством осей позволяет устанавливать на них более высокие концевые опоры при использовании шарнирно-сочлененных штанг одинаковых размеров.

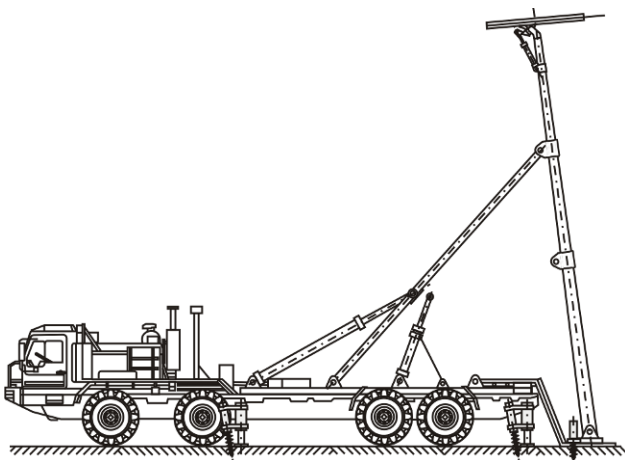


Рис. 2. Конструктивный вариант размещения основного технологического оборудования подвесных канатных дорог на несущей раме базового колесного шасси [29]

В [22] представлен анализ варианта кинематической схемы механизма перемещения концевой опоры для поддержки ведущего канатного шкива с несущим канатом при ее размещении в центральной части многоосного колесного шасси высокой грузоподъемности и проходимости. Механизм обеспечивает подъем концевой опоры из транспортного положения в рабочее положение и ее последующую гидравлическую фиксацию в рабочем положении во время эксплуатации мобильной канатной дороги. Рассмотрены особенности компоновки основного технологического оборудования на базовом самоходном шасси. Разработаны математические модели, обеспечивающие проведение кинематического и силового анализа кинематической схемы гидравлического механизма установки и фиксации концевой опоры. Выполнен анализ влияния основных конструктивных размеров указанного механизма на габариты мобильного канатного комплекса в транспортном положении, а также на силовые факторы, возникающие в процессе эксплуатации канатной системы. Определены условия расположения и длины приводного гидроцилиндра концевой опоры для обеспечения ее необходимого перемещения, выявлено наличие значительной зоны недопустимого расположения шарнирного узла крепления штока гидроцилиндра к металлоконструкции концевой опоры.

Важной задачей, решаемой на стадии проектирования мобильных канатных комплексов, является оценка технических и технологических возможностей выпускаемых отечественной автомобильной промышленностью специальных самоходных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости для их использования в качестве базовых концевых станций мобильных канатных дорог, а также обоснование необходимости и возможности модернизации существующих конструкций шасси. Результаты исследований, посвященных этой проблеме, представлены в [10, 34 - 36].

В [35] представлены результаты разработки трансмиссии специального колесного шасси повышенной грузоподъемности и

проходимости для обслуживания энергетических потребностей при эксплуатации основного технологического оборудования мобильных канатных дорог. Опыт создания и модернизации транспортно-технологических машин различного назначения показывает, что для эффективного выполнения ими производственных задач необходимо наличие отбора мощности от штатного ходового двигателя шасси как для привода механического навесного оборудования, так и привода насосов гидравлических приводов [37, 38]. При этом энергетический модуль должен быть оснащен рациональной и надежной системой отбора мощности от двигателя на привод навесного оборудования [38]. Проведенный анализ предложений на рынке показал, что от штатного ходового двигателя грузового автомобиля возможен отбор до 40% номинальной мощности, что не достаточно для тяжелых и сверхтяжелых мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Например, мощность привода канатной дороги производительностью 400 т/ч равна 220 кВт, что составляет 75% мощности двигателя грузового автомобиля КамАЗ-740, 95% – КамАЗ-43114 или 64% – шестиосного колесного шасси БА3-69099. Для решения этой проблемы необходимо устанавливать дополнительный двигатель. Однако условия компоновки [39] мачтового оборудования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов не предполагают размещение дополнительных двигателей. В этом случае требуется обеспечение большего отбора мощности от штатного ходового двигателя. Для решения этой технической задачи была разработана схема трансмиссии, обеспечивающая повышенный отбор мощности от штатного двигателя внутреннего сгорания самоходного шасси пожарно-спасательного автомобиля [40]. Данная трансмиссия также способно обеспечивать необходимые энергетические потребности основного технологического оборудования мобильных канатных дорог. Структурная схема трансмиссии показана на рис. 3. В [35] представлена математическая модель для исследования динамических рабочих процессов в данной трансмиссии.

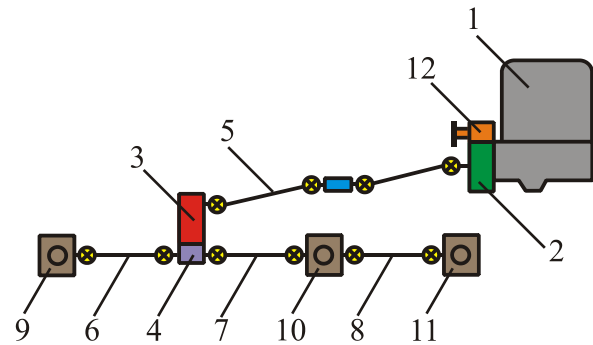


Рис. 3. Структурная схема трансмиссии [40]:
1 - двигатель; 2 - гидротрансформатор;
3 - коробка передач; 4 - раздаточная коробка;
5 - карданная передача с промежуточной опорой; 6, 7, 8 - карданные валы; 9 - редуктор переднего моста; 10, 11 - редукторы заднего моста; 12 - коробка отбора мощности

В ряде работ, сводное описание которых содержится в монографии [10], были проведены исследования напряженно-деформированного состояния наиболее нагруженных и ответственных несущих металлоконструкций многоосных колесных самоходных шасси и буксируемых прицепов отечественного производства, перспективных для использования в качестве базовых концевых станций мобильных канатных дорог. Были выполнены исследования нагруженности, прочности и деформативности таких конструктивных элементов, как несущие рамы колесного многоосного шасси [34] и полуприцепа, узел крепления кабины водителя [36], водоотражающий щит плавающего колесного шасси, тягово-сцепное устройство для буксирования тяжелого прицепа, тягово-седельное устройство для буксирования полуприцепа. В этих исследованиях использовались вычислительные комплексы [41, 42], обеспечивающие проведение прочностных конечноэлементных расчетов с высокой степенью детализации особенностей конструктивного исполнения деталей и узлов. Для каждого расчетного конструктивного элемента на основе геометрической модели разрабатывались соответствующие расчетные конечноэлементные модели. Геометрия листовых тел аппроксимировалась плоскими оболочечными трех- и четырехузловыми конечными элементами, учитывающими толщину металла в каждом узле, твердых тел – объемными тет-

раздральными четырехузловыми конечными элементами. Соединение листовых элементов между собой выполнялось посредством специального инструмента моделирования «сшивка», при использовании которого грани «сшиваются» между собой в единое тело по совпадающим ребрам. При этом в дальнейшем образуется сплошная согласованная конечноэлементная сетка. Массы установленных узлов и агрегатов принимались согласно весовой ведомости на шасси и учитывались в конечноэлементной модели в виде точечных масс, расположенных в их центрах тяжести и связанных с местами крепления специальными интерполяционными конечными элементами распределения массовых нагрузок. Дополнительно для корректной передачи усилий между элементами конструкции в некоторых частях модели применялись специальные объекты моделирования типа «склейка», которые технически были реализованы в виде абсолютно жестких соединений. Соединение некоторых конструктивных элементов осуществлялось при помощи болтовых соединений. В связи с этим, в расчетных моделях были реализованы упрощенные модели болтовых соединений, представляющие собой набор одномерных элементов. Тело болта моделировалось балочным элементом, имеющим геометрические размеры и свойства материала болта, а взаимодействие шляпки/гайки к конструкцией – элементами связи, что обеспечивало корректную силовую схему в области болтового соединения. Построенные таким образом расчетные конечноэлементные модели имели большую размерность: количество узлов сетки конечных элементов достигало до 270 000 узлов, количество конечных элементов – до 330 000 [10].

3. Моделирование рабочих процессов при эксплуатации технологического оборудования и базовых самоходных шасси мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов

Моделирование рабочих процессов являлось еще одним основным направлением деятельности ученых БГУ имени академика

И.Г. Петровского в 2021 году в области мобильных канатных транспортных систем.

Продолжались исследования, посвященные моделированию гидродинамических процессов в насосной гидросистеме механизмов движения и натяжения тягово-несущего каната, а также механизмов перевода из транспортного в рабочее положение, фиксации в рабочем положении и пространственной ориентации поддерживающих конструкций канатной системы мобильной канатной дороги [10, 20]. Учитывая, что в качестве приводного двигателя для работы объемных насосов гидросистемы удобно использовать штатные двигатели внутреннего сгорания самоходных шасси, ранее в [38, 43] была обоснована целесообразность применения комбинированного частотно-дроссельного способа регулирования скорости движения несущего-тягового каната. Этот способ предусматривает возможность изменения частоты вращения выходного вала нерегулируемого насоса путем изменения частоты вращения штатного двигателя самоходного шасси и гидродинамического воздействия на поток проходящей через гидромотор рабочей жидкости путем изменения проходного сечения регулируемых дросселей. Были исследованы возможные альтернативные варианты размещения регулируемых дросселей – установка одного дросселя параллельно гидромотору (рис. 4, а) и установка одного или двух дросселей последовательно с гидромотором (рис. 4, б) [20]. Моделирование гидродинамических процессов выполнялось на основе разработанного ранее в [44] подхода замены принципиальной гидравлической схемы гидропривода на структурно-функциональную схему с вычислением необходимых количественных параметров (давлений и расходов рабочей жидкости), определяющих протекание рабочих процессов в гидросистеме мобильных канатных дорог. Как показали тестовые расчеты конкретной мобильной канатной дороги, 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 транс-

портируемого 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. Для

возможности синтеза оптимального закона частотно-дрессельного регулирования гидропривода мобильных канатных комплексов была разработана и зарегистрирована в Роспатенте России вычислительная программа [37], правообладателем которой является БГУ имени академика И.Г. Петровского.

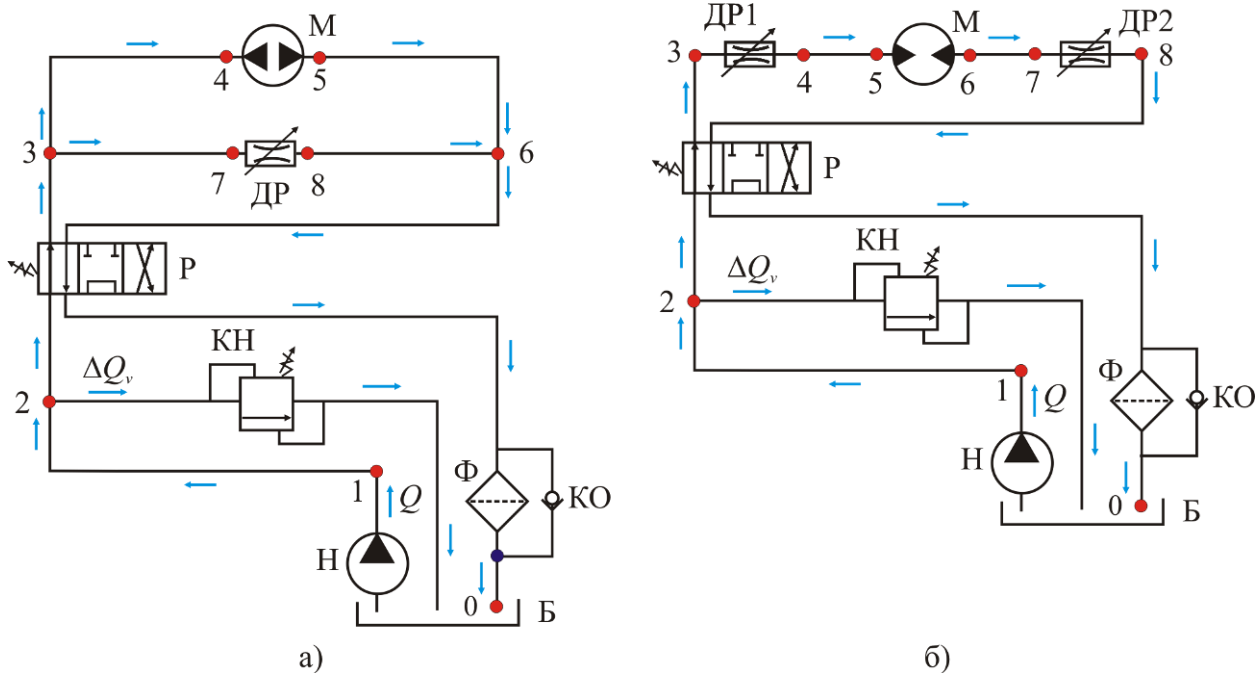


Рис. 4. Принципиальные гидравлические схемы механизма движения несущего каната: а – параллельная установка регулируемого дросселя; б – последовательная установка регулируемых дросселей

В 2021 году исследования были проведены в области компьютерного моделирования кинетики количественных показателей надежности основного технологического оборудования и канатной системы мобильных канатных дорог, формируемых с помощью двух сопряженных самоходных шасси [23], и разработки оптимальных стратегий их технического обслуживания и ремонта [19].

Предложенный в [23] подход позволяет прогнозировать кинетику количественных показателей надежности мобильных канатных дорог и обеспечивать требуемый уровень надежности на основе упреждающей замены во время плановых ремонтов тех структурных элементов, которые достигли предельно допустимого значения вероятности критического отказа. Данный подход целесообразно использовать на стадии проектирования самоходных канатных установок с целью прогно-

зирования надежности и проведения риск-анализа эксплуатации мобильных канатных дорог, образованных с помощью указанных установок. Компьютерное прогнозирование кинетики показателей надежности [17] позволяет решить ряд важных технико-экономических задач, связанных с дальнейшей эксплуатацией спроектированных машин и мобильных канатных дорог: оценить максимальное снижение вероятности безотказной работы в течение нормативного срока службы самоходных канатных установок при заданном графике проведения их плановых ремонтов; оценить влияние периодичности плановых ремонтов на снижение показателей надежности самоходных канатных установок и их отдельных подсистем с целью обеспечения требуемого уровня вероятности безотказной работы; оценить эффективность операций по периодической замене или восстано-

лению структурных элементов мобильной канатной дороги в целом и отдельных самоходных канатных установок; определить для каждого планового ремонта объем необходимых восстановительных работ и перечень подлежащих восстановлению структурных элементов, приводящих к критическим отказам; получить исходные данные для расчета и оптимизации технического риска эксплуатации мобильных канатных дорог в соответствии с известными подходами [46, 47]. Для моделирования надежности гидрофицированной мобильной канатной дороги на базе самоходных шасси была разработана и зарегистрирована в Роспатенте России вычислительная программа [17], правообладателем которой является БГУ имени академика И.Г. Петровского.

В [19] рассматривается разработка метода формирования эффективной технико-экономической стратегии восстановления во время плановых ремонтов тех конструктивных элементов самоходных транспортных установок, которые могут приводить к критическим отказам канатной дороги. Метод включает прогнозирование кинетики вероятности безотказной работы канатной дороги в течение всего срока ее эксплуатации на основе прогнозирования безотказной работы ключевых структурных элементов транспортных установок, отказ которых приводит к аварийному нарушению работы канатной дороги. В процессе интегрирования системы дифференциальных уравнений Чепмена-Колмогорова выполняется периодическое ее переформирование в моменты времени проведения плановых ремонтов, что позволяет учесть необходимость дискретного изменения вероятности безотказной работы восстанавливаемых конструктивных элементов. В качестве технико-экономического критерия оптимальности стратегии плановых ремонтов канатной дороги используется условие получения минимальной суммарной стоимости ремонтов в течение всего срока ее эксплуатации при обеспечении среднего значения вероятности безотказной работы, которое устанавливается в техническом задании на проектирование. Формирование такой оптимальной стратегии включает планирова-

ние графиков проведения, числа, моментов времени, объемов и стоимости плановых ремонтно-восстановительных мероприятий самоходных транспортных установок. Также представлены результаты расчета показателей оптимальной стратегии плановых ремонтов применительно к мобильной грузовой канатной дороге, формируемой на основе самоходных транспортных установок с расположением концевой опоры для высотного размещения необходимого технологического оборудования в концевой части несущей рамы шасси.

4. Исследования в области проектирования и эксплуатации стационарных пассажирских и грузовых канатных дорог

Актуальность исследований в области проектирования и эксплуатации стационарных пассажирских и грузовых подвесных канатных дорог определяется тем фактом, что канатные транспортные технологии в ближайшем будущем станут эффективной альтернативой обеспечения устойчивой жизнедеятельности социально-экономической и производственно-транспортной инфраструктуры сильно урбанизированных территорий и будут способствовать практической реализации интенсивно развиваемой в последние годы концепции «Умного города» [48, 49]. Одним из шести ключевых показателей, характеризующих понятие «умный город», является показатель «Умная мобильность». Согласно данным социологических опросов, этот показатель как приоритетный отмечают более 80 % исследователей в сфере урбанистики будущего [49]. Ключевой проблемой для развития общественного транспорта сильно урбанизированных территорий является значительный дефицит земли для прокладки новых многополосных магистралей. В таких условиях подвесные канатные дороги, технологическое оборудование которых базируется на использовании мехатронных модулей движения, имеют объективные перспективы для использования, так как относятся к внеуличному виду интеллектуальных транспортных систем и реализует частичный

перенос транспортных потоков в надземное пространство. Основными техническими и социальными преимуществами подвесных канатных дорог по сравнению с традиционными видами наземного общественного транспорта являются [48]: высокая средняя скорость перемещения пассажиров и четкая прогнозируемость времени поездки; отсутствие потерь времени на вынужденные простои и ожидание в пробках; отсутствие дорожно-транспортных происшествий; сохранение сложившейся в городе дорожно-уличной сети и инженерной инфраструктуры; использование электрической тяги, не оказывающей негативного влияния на окружающую среду, низкий уровень шума и вибраций, отсутствие вредных выбросов; минимальное землеотведение, отсутствие необходимости выкупа или отчуждения дорогостоящих земельных участков, сноса имеющихся зданий и сооружений под прокладку наземной трассы.

В [11, 18] разработана математическая модель и процедура ускоренной оптимизационной оценки базовых технических характеристик стационарной подвесной канатной дороги (шага и высоты промежуточных опор, усилия натяжения несущих канатов) на основе минимизации суммарной стоимости опорных конструкций и канатной системы с учетом необходимых конструктивных и прочностных ограничений. Процедура имеет повышенную вычислительную эффективность, так как базируется на использовании более простых математических методов, требует меньшего времени и вычислительных ресурсов для проведения необходимых оптимизационных расчетов, чем это было необходимо при решении ранее разработанных задач оптимизации [50, 51]. Снижение трудоемкости вычислений основано на том, что положение точки минимума целевой функции требуется искать вдоль линии одного из этих ограничений – ограничения на минимальное усилие натяжения несущих канатов. Это позволило предложить два пути снижения трудоемкости вычислений [18]: 1) снижение размерности задачи оптимизации; 2) замена поиска минимума целевой функции на решение нелинейного алгебраического уравнения. При

этом он позволяет получить точно такие же оптимальные значения основных технических характеристик подвесной канатной дороги, что и при решении разработанной ранее общей задачи технико-экономической оптимизации [50, 51], но с применением более простых математических методов. Предложенный метод целесообразно использовать на начальных стадиях разработки проекта подвесной канатной дороги. Он позволяет с минимальными затратами времени выполнить оценку оптимальных значений основных технических характеристик проектируемой канатной дороги для большого числа возможных сочетаний конструкций промежуточных опор, типов и размеров несущих канатов, стоимости технологического оборудования. Сравнительный анализ результатов этих расчетов обеспечивает выработку оптимально обоснованного проектного решения для последующего проектирования.

5. Исследования в области проектирования и эксплуатации мобильных грузоподъемных машин

Исследования в области проектирования и эксплуатации мобильных грузоподъемных машин проводились, главным образом, применительно к моделированию динамических процессов [52] и потери общей устойчивости на слабых грунтах при работе мобильных колесных кранов-манипуляторов [21, 45]. Также рассматривались актуальные вопросы применения диагностических карт при экспертизе промышленной безопасности мостовых кранов [53].

Мобильные гидравлические краны-манипуляторы на самоходных шасси широко используются для выполнения разнообразных погрузочно-разгрузочных, транспортных и складских работ, что объясняется важными техническими достоинствами таких кранов – высокой мобильностью, универсальностью применения, возможностью работы на заранее не обустроенных площадках. Однако для них характерен такой существенный недостаток, как риск опрокидывания вследствие нарушения общей устойчивости шасси при манипулировании грузами

недопустимо большого веса или вследствие проседания грунта под одним или несколькими аутригерами [54]. Подобные аварии составляют приблизительно 45 % общего числа аварий мобильных кранов-манипуляторов и поэтому обеспечение общей устойчивости мобильных кранов имеет важное значение для повышения надежности и безопасности их эксплуатации [55]. Для исключения подобных аварий и повышения запаса устойчивости мобильных кранов используются аутригеры, обеспечивающие передачу весовых нагрузок на грунт рабочей площадки. При работе на слабых грунтах наблюдается неравномерное проседание аутригеров вследствие уплотнения грунта под действием нестационарных опорных реакций, что приводит к раскачиванию как самого крана в горизонтальной плоскости, так и к опасному раскачиванию груза. Эффективным способом улучшения функциональных характеристик аутригеров при работе мобильных кранов на слабых грунтах является их дополнительная анкеровка с помощью устройств винтового или прокалывающего типа. Известные подходы [56] к оценке влияния анкерных аутригеров на устойчивость мобильных кранов основаны на статическом представлении грунта в течение всего времени работы. Это не позволяет исследовать процесс взаимодействия анкерного устройства с грунтом во времени, включая стадию потери устойчивости крана, что важно при создании новых эффективных конструкций анкерных аутригеров. Поэтому в работах [21, 45] для повышения достоверности прогнозирования работы крана на слабых грунтах было предложено рассматривать динамику системы «груз – манипулятор – шасси – анкерный аутригер – грунт» в целом с учетом реологи-

ческих свойств грунтов разных типов. Построенная в результате математическая динамическая модель раскачивания мобильного крана-манипулятора в процессе работы, учитывающая эффекты взаимодействия анкерных аутригеров со слабым грунтом опорного основания, позволяет моделировать экспериментально выявленное постепенное уплотнение грунта в районе внедрения рабочего элемента анкерного устройства аутригера. Тестовые расчеты показали, что с увеличением в грунте зазоров между рабочим органом анкерного устройства и опорной поверхностью грунта возрастает скорость изменения угла наклона шасси и период раскачивания мобильной машины при работе крана-манипулятора. Поэтому для грунтов, характеризующихся многократным уплотнением, параметры раскачивания в течение начальной стадии работы крана постепенно возрастают до достижения ими некоторых установившихся значений, определяемых жесткостью грунта.

6. Заключение

В результате фундаментальных и прикладных исследований, проведенных в 2021 году учеными Брянского государственного университета имени академика И.Г. Петровского в области мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов и стационарных подвесных канатных дорог получен и научно обоснован ряд новых технических решений образцов технологического оборудования транспортных канатных систем, а также разработаны математические модели и вычислительные средства для моделирования протекающих во время их эксплуатации различных рабочих процессов.

Список литературы

1. Научный сайт БГУ имени академика И.Г. Петровского. Режим доступа: <https://nauka-brgu.ru/> (дата обращения 12.12.2021).
2. Научно-исследовательская лаборатория транспортно-логистических роботизированных технологий и комплексов безопасной урбанизированной среды. Режим

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]. Available at: <https://brgu.ru/science/general-information/nauchnye-podrazdeleniya/nil->

доступа: <https://brgu.ru/science/general-information/nauchnye-podrazdeleniya/nit-transportno-logisticheskie-robotizirovannye-tehnologii/> (дата обращения 12.12.2021).

3. 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.

4. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Prospects for the use of mobile ropeways in the elimination of the consequences of natural and man-made disasters // Proceedings of the 8th Congress on Scientific Researches and Recent Trends. Zambales, Philippines, August 2-4, 2021. P. 58.

5. 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.

6. 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

7. 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.

8. Химич А.В., Толкачев Е.Н. Создание и использование цифровых двойников канатных транспортных систем // Сб. мат. XXV Московской междунар. межвуз. научно-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы». М: РУТ, 2021. С. 120-123.

9. Перминова Д.И. Создание натуральных и

transportno-logisticheskie-robotizirovannye-tehnologii-/ (In Russian)

3. 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: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3551132>. (In Russian)

4. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Prospects for the use of mobile ropeways in the elimination of the consequences of natural and man-made disasters. In: Proceedings of the 8th Congress on Scientific Researches and Recent Trends. Zambales, Philippines, August 2-4, 2021. P. 58.

5. 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)

6. 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)

7. 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)

8. Khimich A.V., Tolkachev E.N. Soznanie i ispolzovanie tsifrovyykh dvoynikov kanatnykh transportnykh system. In: *Sb. mat. XXV Moskovskoy mezhdunar. mezhvuz. nauchno-tekhn. konf. studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh «Podemno-transportnye, stroitelnye, dorozhnye, putevye*

виртуальных макетов подъемно-транспортных машин // Сб. мат. Междунар. научно-техн. конф. «Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях». Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. С. 201-205.

10. 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

11. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Оптимальное проектирование подъемно-транспортных машин. Москва: Издательство Юрайт, 2021. 293 с.

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

13. Компонировка и силовой анализ технологического оборудования мобильного канатного комплекса / А.В. Лагерев, В.И. Таричко, И.А. Лагерев, Перминова Д.И. Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021614929. Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 31.03.21.

14. Компонировка и расчет комбинированного механизма подъема и фиксации концевой опоры мобильного канатного комплекса / А.В. Лагерев, В.И. Таричко, И.А. Лагерев. Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021617351. Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 13.05.21.

15. Компонировка и анализ штангового механизма подъема и фиксации концевой опоры мобильного канатного комплекса / А.В. Лагерев, В.И. Таричко, И.А. Лагерев. Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021617498. Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 14.05.21.

16. Синтез оптимального закона частотно-дрессельного регулирования гидропривода мобильного канатного комплекса / Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021660927. Зарегистрир. в Реестре программ для ЭВМ 05.07.2021.

17. Моделирование надежности гидро-

mashiny i robototekhnicheskie komplekсы». Moscow, RUT, 2021, pp. 120-123. (In Russian)

9. Perminova D.I. Sozdanie naturnykh i virtualnykh maketov podemno-transportnykh mashin. In: *Sb. mat. Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. «Energo-resursosberegayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoy i stroitelnoy otraslyakh»*. Belgorod: BGTU im. V.G. Shukhova, 2021, pp. 201-205. (In Russian)

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

11. Lagerev A.V., Lagerev I.A. *Optimalnoe proektirovanie podemno-transportnykh mashin* [Optimal design of lifting and transport machines]. Moscow, Urayt, 2021. 293 p. ISBN 978-5-534-13646-3 (In Russian)

12. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Konstruksii i osnovy proektirovaniya mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh komplekсов* [Structures and design fundamentals of mobile transporting and overloading rope facilities]. Bryansk, RISO BGU, 2020. 207 p. (In Russian)

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

14. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. *Komponovka i raschet kombinirovannogo mekhanizma podema i fiksatsii kontsevoy opory mobilnogo kanatnogo kompleksa. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [Layout and calculation of the combined mechanism for lifting and fixing the end tower of a mobile rope complex. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2021617351, 2021. (In Russian)

фицированной мобильной канатной дороги на базе самоходных шасси / Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv И.А. Свид-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2021661113. Зарегистр. в Реестре программ для ЭВМ 06.07.2021.

18. Lagerev, A.V., Lagerev, I.A. Reducing labor intensity when computing optimal technical characteristics of aerial ropeways // *FME Transactions*. 2021. Vol. 49. No. 1. P. 72-77. DOI: 10.5937/fme2101072L

19. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal planning of the mobile cargo ropeway repair strategy // *ResearchSquare*. October 05th, 2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-936680/v1

20. 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

21. Lagerev I.A., Lagerev A.V., Tarichko V.I. Modeling the swing of mobile loader cranes with anchor outriggers when operating on weak soils // *E3S Web of Conferences*, 2021, Vol. 326. 00011.

22. 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) *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-85230-6_46

23. 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*, 2021, Vol. II, pp. 745-754. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_86.

24. Лагереv И.А. Особенности перевода научных статей в области мобильных канатных дорог для публикации в журналах Scopus // Сб. мат. Междунар. научно-практ. конф. «Актуальные проблемы переводоведения и лингводидактики в контексте межкультурного взаимодействия». Брянск: БГУ, 2021. С. 22-29.

25. Пат. 204003 Рос. Федерация: МПК⁷

15. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. *Komponovka i analiz shtangovogo mekhanizma podema i fiksatsii koncevoy opory mobilnogo kanatnogo kompleksa. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [Layout and analysis of the rod mechanism for lifting and fixing the end tower of a mobile rope complex. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2021617498, 2021. (In Russian)

16. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. *Sintez optimalnogo zakona chastotno-drosselnogo regulirovaniya gidroprivoda mobilnogo kanatnogo kompleksa. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [Synthesis of the optimal law of frequency-throttle control of the hydraulic drive of a mobile rope complex. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2021660927, 2021. (In Russian)

17. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. *Modelirovanie nadezhnosti gidrofitsirovannoy mobilnoy kanatnoy dorogi na baze samokhodnykh shassi. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [Modeling the reliability of a hydrofied mobile ropeway based on self-propelled chassis. The Certificate on official registration of the computer program]. No. 2021661113, 2021. (In Russian)

18. Lagerev, A.V., Lagerev, I.A. Reducing labor intensity when computing optimal technical characteristics of aerial ropeways. *FME Transactions*, 2021, Vol. 49, No. 1, pp. 72-77. DOI: 10.5937/fme2101072L

19. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal planning of the mobile cargo ropeway repair strategy. *ResearchSquare*. October 05th, 2021. DOI: 10.21203/rs.3.rs-936680/v1

20. 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

21. Lagerev I.A., Lagerev A.V., Tarichko V.I. Modeling the swing of mobile loader cranes with anchor outriggers when operating on weak soils. *E3S Web of Conferences*, 2021, Vol. 326, 00011.

B61D 7/00, B61D 7/06, B66C 23/16. Самоходная концевая станция мобильной канатной дороги / Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «БГУ им. ак. И.Г. Петровского». - № 2020140506; заявл. 08.12.2020. Оpubл. 04.05.2021. Бюл. № 13.

26. Пат. 204005 Рос. Федерация: МПК⁷ B61D 7/00, B61D 7/06, B66C 23/16. Самоходная концевая станция мобильной канатной дороги / Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «БГУ им. ак. И.Г. Петровского». - # 2020141677; заявл. 16.12.2020; опубл. 04.05.2021. Бюл. № 13.

27. Пат. 206299 Рос. Федерация: МПК⁷ B61D 7/00, B61D 7/06, B66C 23/16. Самоходная концевая станция мобильной канатной дороги / Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «БГУ им. ак. И.Г. Петровского». - № 2021112278; заявл. 27.04.2021; опубл. 03.09.2021. Бюл. № 25.

28. Лагерев И.А., Таричко В.И. Проектирование канатных дорог нового поколения // Сб. мат. XXI междунар. научно-практ. конф. «Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов». Чита: ЗабГУ, 2021. С. 168-174.

29. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Предварительная компоновка основного технологического оборудования самоходной машины мобильной канатной дороги со штанговым механизмом установки и фиксации концевой опоры // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №4. С. 336-347. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-04-336-347

30. Лагерев И.А., Лагерев А.В., Таричко В.И. Варианты компоновки основного технологического оборудования на базовых шасси мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов и их сравнительный анализ // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №3. С. 236-250. DOI:10.22281/2413-9920-2021-07-03-236-250

31. Лагерев И.А., Таричко В.И. Компоновка оборудования мобильной канатной дороги на базе колесного шасси // Сб. мат.

22. 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) Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-85230-6_46

23. 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*, 2021, Vol. II, pp. 745-754. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_86.

24. Lagerev I.A. Features of translation of scientific articles in the field of mobile ropeways for publication in Scopus journals. In: *Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Actual problems of translation studies and linguodidactics in the context of intercultural interaction"*. Bryansk: BGU, 2021, pp. 22-29. (In Russian)

25. Patent RU 204003, B61B 7/00, B61B 7/06, B66C 23/16. *Samokhodnaya kontseвая stantsiya mobilnoy kanatnoy dorogi* [Self-propelled terminal station of the mobile ropeway]. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Declared 08.12.2020. Published 04.05.2021. (In Russian)

26. Patent RU 204005, B61B 7/00, B61B 7/06, B66C 23/16. *Samokhodnaya kontseвая stantsiya mobilnoy kanatnoy dorogi* [Self-propelled terminal station of the mobile ropeway]. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Declared 16.12.2020. Published 04.05.2021. (In Russian)

27. Patent RU 206299, B61B 7/00, B61B 7/06, B66C 23/16. *Samokhodnaya kontseвая stantsiya mobilnoy kanatnoy dorogi* [Self-propelled terminal station of the mobile ropeway]. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Declared 27.04.2021. Published 03.09.2021. (In Russian)

28. Lagerev I.A., Tarichko V.I. Design of new generation ropeways. In: *Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference "Kulagin readings: techniques and technologies of production processes"*. Chita, ZabGU, 2021, pp. 168-174. (In Russian)

XXV Московской междунар. межвуз. научно-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные, путевые машины и робототехнические комплексы». М: РУТ, 2021. С. 73-75.

32. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv И.А. Обеспечение вертикального габарита самоходной машины со штанговым механизмом установки и фиксации концевой опоры для мобильной канатной дороги // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №2. С. 141-152. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-02-141-152

33. Пат. 200827 Рос. Федерация: МПК⁷ В61В 7/06. Самоходная концевая станция / Лагереv А.В., Лагереv 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.

34. Таричко В.И., Лагереv И.А. Нагруженность несущей конструкции базовой станции мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Мат. Всеросс. научно-практ. конф. «Инновационное развитие подъемно-транспортной техники». Брянск: БГТУ, 2021. С. 137-140.

35. Таричко В.И., Перминова Д.И. Основные результаты разработки трансмиссии перспективного шасси для размещения мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №1. С. 66-72. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-66-72

36. Шалупина П.И., Артемова А.А. Оценка прочности элементов крепления кабины колесного шасси высокой грузоподъемности // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №4. С. 404-417. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-04-404-417

37. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv И.А. Моделирование режимов работы гидрориводов с частотно-дрессельным регулированием мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского госу-

29. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Preliminary layout of the main technological equipment of a self-propelled machine with a rod mechanism for installing and fixing the end tower for a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.4, pp. 336-347. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-04-336-347 (In Russian)

30. Lagerev I.A., Lagerev A.V., Tarichko V.I. Variants of the layout of the main technological equipment on the base chassis of mobile transport and reloading rope complexes and their comparative analysis. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.3, pp. 236-250. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-03-236-250 (In Russian)

31. Lagerev I.A., Tarichko V.I. Layout of mobile ropeway equipment based on a wheeled chassis. In: *Proceedings of the XXV Moscow International Interuniversity Scientific and Technical Conference of students, undergraduates, postgraduates and young scientists "Lifting, transport, construction, road, track machines and robotic complexes"*. Moscow, RUT, 2021, pp. 73-75. (In Russian)

32. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Providing the vertical dimension of a self-propelled machine with a rod mechanism for installing and fixing the end tower for a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.2, pp. 141-152. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-07-02-141-152 (In Russian)

33. 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)

34. Tarichko V.I., Lagerev I.A. Loading of the load-bearing structure of the base station of the mobile transport and reloading rope complex. In: *Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference "Innovative development of lifting and transport equipment"*. Bryansk, BGTU, 2021, pp. 137-140. (In Russian)

35. Tarichko V.I., Perminova D.I. The

дарственного университета. 2019. №4. С. 462-480. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480

38. Котлобай А.Я., Коробкин В.А., Тамело В.Ф., Костко Ю.В., Кондратьев С.В. Проблемные вопросы диверсификации гражданской техники в технику военного назначения // Вестник БНТУ. 2009. №4. С. 54-60.

39. 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

40. Пат. 2738871 Рос. Федерация: МПК⁷ В60К 17/34. Трансмиссия пожарно-спасательного автомобиля / Таричко В.И., Левковец Н.Р., Киселев О.В., Полехин Д.Э.; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «Брянский автомобильный завод» (АО "БАЗ"). - № 2020117459; заявл. 27.05.2020; опубл. 17.12.2020, Бюл. № 35.

41. Лагерев И.А. Расчеты грузоподъемных машин методом конечных элементов. Брянск: БГТУ, 2013.

DOI:10.5281/zenodo.1202235

42. Вершинский А.В., Лагерев И.А., Шубин А.Н., Лагерев А.В. Расчет металлических конструкций подъемно-транспортных машин методом конечных элементов. Брянск: РИО БГУ, 2015. 210 с. DOI: 10.5281/zenodo.1202240

43. 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

44. 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.

main results of the development of the transmission a promising chassis for the placement of a mobile transport and overloading rope complex. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.1, pp. 66-72. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-66-72 (In Russian)

36. Shalupina P.I., Artyemova A.A. Assessment of the strength of the cabin mounting elements of the high-capacity wheeled chassis. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.4, pp. 404-417. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-04-404-417 (In Russian)

37. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Modeling operation modes of hydraulic drives with frequency-throttle regulation of mobile transport and overloading ropes complexes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 462-480. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480 (In Russian)

38. Kotlobay A.Ya., Korobkin V.A., Tamelo V.F., Kostko Yu.V., Kondratiev S.V. The issues of diversification of civil engineering in equipment for military use. *Vestnik BNTU*, 2009, No.4, pp. 54-60. (In Russian)

39. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Placement of technological equipment on the basic chassis of the mobile transportation and reloading rope complex. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.3, pp. 388-403. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-388-403 (In Russian)

40. Patent RU 2738871, В60К 17/34. *Transmissiya pozharno-spasatel'nogo avtomobilya* [Fire Rescue Vehicle Transmission]. Tarichko V.I., Levkovets N.R., Kiselev O.V., Polekhin D.E. 17.12.2020. (In Russian)

41. Lagerev I.A. *Rascheti gruzopodyemnykh mashin metodom konechnykh elementov* [Load-lifting machines calculations by finite element method]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Tekhnicheskii Universitet, 2013. 116 p. DOI:10.5281/zenodo.1202235 (In Russian)

42. Vershinskii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Raschet metallicheskiikh konstruktсий pod'emno-transportnykh mashin*

DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379>

45. Лагереv И.А., Лагереv А.В., Таричко В.И. Моделирование раскачивания мобильных кранов-манипуляторов с анкерными ауригерами при работе на слабонесущих грунтах // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. Сб. тезисов VIII Междунар. научно-практ. конф. Санкт-Петербург, 2021. С. 213-217.

46. Težak S., Toš Z. Reliability analysis of operation for cableways by FTA (fault tree analysis) method. *Promet – Traffic&Transportation*, Vol. 22, 2010, No. 3, 163-173. DOI:10.7307/ptt.v22i3.272

47. Finkelstein M. Failure Rate Modelling for Reliability and Risk. Springer Series in Reliability Engineering. Springer-Verlag London Limited, 2008. 296 p. DOI 10.1007/978-1-84800-986-8. ISBN 978-1-84800-985-1

48. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Social advantages of using ropeway transport technologies in a modern urbanized environment // Proceedings of the 5th Middle East Int. Conf. on Contemporary Scientific Studies, Vol. II. P. 104-105. Ankara, Turkey, March 27-28, 2021.

49. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Aerial passenger cable cars as part of the smart city concept // Proceedings of the 2nd International Sciences and Innovation Congress. P. 103. Ankara, Turkey, May 22-23, 2021.

50. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Оптимизация шага установки промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро // Вестник Брянского государственного университета. 2014. №4. С. 22-31. DOI: 10.5281/zenodo.1302237

51. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Влияние параметров рельефа на выбор оптимального шага промежуточных опор вдоль линии канатного метро // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2017. № 3. С. 253-272. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-03-253-272

52. Химич А.В. Моделирование динамики стреловых кранов на колесных шасси // Сб. мат. Междунар. научно-техн. конф. «Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной

metodom konechnykh elementov [Calculation of metal constructions of lifting-transport machines by finite element method]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2015. 210 p. DOI: 10.5281/zenodo.1202240 (In Russian)

43. 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-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.1, pp. 73-92. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-73-92 (In Russian)

44. 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-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2018, No.4, pp. 355-379. DOI: 10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379 (In Russian)

45. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Modeling of hydrodynamic and kinematic processes during the operation of a mobile cargo rope complex. In: *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)

46. Težak S., Toš Z. Reliability analysis of operation for cableways by FTA (fault tree analysis) method. *Promet–Traffic&Transportation*, 2010, Vol. 22, No. 3, pp. 163-173. DOI:10.7307/ptt.v22i3.272

47. Finkelstein M. Failure Rate Modelling for Reliability and Risk. Springer Series in Reliability Engineering. Springer-Verlag London Limited, 2008. 296 p. DOI 10.1007/978-1-84800-986-8. ISBN 978-1-84800-985-1

48. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Social advantages of using ropeway transport technologies in a modern urbanized environment. *Proceedings of the 5th Middle East Int. Conf. on Contemporary Scientific Studies*, 2021, Vol. II, pp. 104-105. Ankara, Turkey, March 27-28, 2021.

49. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Aerial pas-

отраслях». Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. С. 264-270.

53. Перминова Д.И. Применение диагностических карт при экспертизе промышленной безопасности мостовых кранов // Мат. Всеросс. научно-практ. конф. «Инновационное развитие подъемно-транспортной техники». Брянск: БГТУ, 2021. С. 115-120.

54. Duerr D. Mobile crane support handbook Duerr. Levare Press, Inc. 2019. 266 p.

55. Doci I., Lajqi N., Lajqi Sh. Crawler crane overturning analysis for the case of boom luffing motion // IREME. 2018. Vol. 12. №2.

56. Jeng S.-L., Yang C.-F., Chieng W.-H. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization // Mechanics Based Design of Structures and Machines. 2010. Vol. 38. №2. P. 145-170.

senger cable cars as part of the smart city concept. In: *Proceedings of the 2nd International Sciences and Innovation Congress*, 2021, pp. 103. Ankara, Turkey, May 22-23, 2021.

50. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimizing the step of installation of intermediate tower structures along the ropeway line. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, No.4, pp. 22-30. DOI: 10.5281/zenodo.1302237 (In Russian)

51. Lagerev A.V., Lagerev I.A. The effect of topography on the choice of optimal step intermediate supports along the line of the cable metro. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.3, pp. 253-272. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-03-253-272 (In Russian)

52. Khimich A.V. Simulation of the dynamics of jib cranes on wheeled chassis. In: *Sb. mat. Mezhdunar. nauchno-tekh. konf. «Energo-resursosberegayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoy i stroitelnoy otraslyakh»*. Belgorod: BGTU im. V.G. Shukhova, 2021, pp. 264-270. (In Russian)

53. Perminova A.A. The use of diagnostic cards in the examination of industrial safety of overhead cranes. In: *Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference "Innovative development of lifting and transport equipment"*. Bryansk, BGTU, 2021, pp. 115-120. (In Russian)

54. Duerr D. Mobile crane support handbook Duerr. Levare Press, Inc. 2019. 266 p.

55. Doci I., Lajqi N., Lajqi Sh. Crawler crane overturning analysis for the case of boom luffing motion. *IREME*, 2018, Vol. 12, No. 2.

56. Jeng S.-L., Yang C.-F., Chieng W.-H. Outrigger force measure for mobile crane safety based on linear programming optimization. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2010, Vol. 38, No. 2, pp. 145-170.

УДК (UDC) 621.86

СИСТЕМА ТЕПЛООВОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ

THERMAL DIAGNOSIS SYSTEM OF BELT CONVEYORS

Гончаров К.А.
Goncharov K.A.Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)
Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. Ленточные конвейеры являются одним из наиболее сложных объектов диагностики технического состояния в связи с взаимодействием на протяженных участках трасс элементов рабочего процесса различного генезиса: сыпучий груз - упругая грузонесущая лента - жесткие несущие конструкции. Различия в природе происхождения и особенностях механической работы указанных элементов предполагают наличие дифференцированного подхода к диагностированию технического состояния ленточных конвейеров при эксплуатации с применением специфического оборудования. При этом в современных промышленных условиях широко используются способы диагностирования на основе новых или ранее не применявшихся физических явлений. В статье впервые предложена система теплового диагностирования узлов, агрегатов и элементов ленточных конвейеров, основанная на результатах ряда проведенных экспериментальных исследований. Показаны преимущества и недостатки теплового диагностирования транспортирующих машин в движении. Предложены базовые положения теплового диагностирования, позволяющие гармонично интегрировать предложенную систему в существующий комплекс мероприятий по контролю технического состояния ленточных конвейеров на стадиях монтажа и эксплуатации в виде дополнительных рекомендаций и отчетных документов. Обобщены результаты экспериментальных исследований рабочих процессов ленточных конвейеров методом теплового диагностирования и разработаны поэлементные рекомендации при проведении теплового контроля, объединенные в общую методику.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, тепловой контроль, ленточный конвейер, привод, мотор-барабан, система диагностирования.

Дата принятия к публикации: 18.11.2021
Дата публикации: 25.03.2022

Сведения об авторах:

Гончаров Кирилл Александрович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»,
e-mail: ptm_bstu@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-5895-1162

Abstract. Belt conveyors are one of the most difficult objects of technical condition diagnostics due to the interaction of elements of the work process of various genesis on extended sections of the routes: bulk cargo - elastic load-carrying belt - rigid load-bearing structures. Differences in the nature of the origin and the features of the mechanical operation of these elements suggest the presence of a differentiated approach to diagnosing the technical condition of belt conveyors when operating with the use of specific equipment. At the same time, in modern industrial conditions, diagnostic methods based on new or previously unused physical phenomena are widely used. The article is the first to propose a system for thermal diagnostics of units, assemblies and elements of belt conveyors, based on the results of a number of experimental studies. The advantages and disadvantages of thermal diagnostics of transporting machines in motion are shown. The basic provisions of thermal diagnostics are proposed, which make it possible to harmoniously integrate the proposed system into a well-established set of measures for monitoring the technical condition of belt conveyors at the stages of installation and operation in the form of additional recommendations and reporting documents. The results of experimental studies of the working processes of belt conveyors by the method of thermal diagnostics are generalized and element-by-element recommendations for conducting thermal control are developed, combined into a general method.

Keywords: experimental study, thermal control, belt conveyor, drive, motor drum, diagnosis system.

Date of acceptance for publication: 18.11.2021
Date of publication: 25.03.2022

Authors' information:

Kirill A. Goncharov – PhD in Technical Sciences, associate Professor, head of the Department "Handling machinery and equipment" at Bryansk State Technical University, e-mail: ptm_bstu@mail.ru.

ORCID: 0000-0002-5895-1162

Благодарности

*Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда
№ 22-29-00798*

Acknowledgements

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

Введение

Ленточные конвейеры являются достаточно сложными объектами с позиции контроля их технического состояния. В частности, протяженные (магистральные) конвейеры требуют значительных усилий и затрат при визуальном осмотре во время обхода из-за конфигураций трасс, наличия значительного числа объектов контроля (роликов, элементов става, ленты значительной длины), необходимости пошагового применения стационарной диагностической аппаратуры, частой невозможности остановки конвейеров, работающих в непрерывном режиме.

Организационные структуры систем эксплуатации ленточных конвейеров различны и зависят от возможностей предприятий-изготовителей и предприятий, непосредственно эксплуатирующих объекты. При этом важнейшей частью каждой из таких структур являются подсистемы диагностирования технического состояния конвейера.

Целью технической диагностики подъемно-транспортной техники, согласно [1], является повышение надежности соответствующих видов машин и оборудования, эффективности их использования и увеличение ресурса вследствие сокращения трудовых, временных и материальных затрат во всех периодах эксплуатации за счет обеспечения оптимальных режимов функционирования, технического обслуживания и ремонта. Дополнительно, в качестве одной из первостепенных задач диагностики в работе [1] выделяется распознавание технического состояния машины в условиях ограниченной информации. Указанная задача, как правило, решается созданием и реализацией плана упреждающих мероприятий в области контроля технического состояния конвейера. В источнике [2] дана характеристика различным видам контроля технического состояния ленточных конвейеров, в частности контролю перед пуском, контролю при приеме-сдаче смены, кон-

тролю в процессе работы конвейера, контролю технического состояния различных узлов и элементов конвейера. Каждый из указанных видов контроля подразумевает набор специфических документально фиксируемых диагностических мероприятий, при этом все мероприятия можно условно разделить на две категории: мероприятия, проводимые при остановленном конвейере, и мероприятия, проводимые при движении конвейера.

Парадоксальность диагностирования технического состояния ленточных конвейеров в глобальном плане заключается в том, что наилучшее качество диагностирования совместно с наиболее широким спектром возможностей достигается в случае остановленного конвейера, однако, большую часть рабочего фонда времени ленточные конвейеры проводят в движении, а определенные магистральные конвейеры могут работать без остановки несколько лет, что значительно снижает диагностические возможности обслуживающего персонала.

Согласно [2] во время эксплуатации наряду с общепринятой основной документацией (паспорт, руководство по эксплуатации) ленточные конвейеры дополнительно снабжаются книгой записи осмотра конвейера и ленты, книгой смазки конвейера, книгой приемки и сдачи смены. Все диагностические операции, соответствующие описанным выше видам контроля, вносятся в указанные книги и характеризуются, как правило, применением визуального способа идентификации дефектов элементов машины.

Отдельно стоит выделить существующие специфические особенности диагностирования состояния и положения конвейерных лент, заключающиеся в применении ряда датчиков и концевых выключателей, интегрированных в общую систему управления конвейером. В данном случае диагностирование повреждения происходит автоматически с указанием координаты сработавшего датчика на трассе конвейера.

Таким образом, можно выделить два основных негативных фактора при диагностировании технического состояния протяженного ленточного конвейера:

- частая невозможность остановки конвейера для проведения диагностических мероприятий;
- применение визуального контроля технического состояния элементов конвейера при длительном обходе протяженной трассы, что значительно снижает качество выявления дефектов.

Одним из стремительно развивающихся способов диагностирования в последнее время является тепловой контроль. Однако основное применение тепловой контроль получил исключительно в рамках диагностирования состояния строительных конструкций (тепловых сетей, дымовых труб, элементов котельных и т.п.). Известны работы по применению теплового контроля в рамках диагностирования технического состояния гидроприводов строительных и дорожных машин [3], а также исследований свойств деталей из вновь разрабатываемых полимерных материалов [4].

В работах [7–11] проведен широкий спектр тепловых исследований различных узлов ленточного конвейера в движении с использованием специализированного стенда, описанного в [5, 10, 11]. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что тепловое диагностирование позволяет выявлять специфические особенности работы элементов и узлов ленточных конвейеров [10]. При этом особое значение имеет отсутствие необходимости остановки конвейера для проведения стационарной тепловой съемки, т.к. указанные специфические особенности можно установить только при движении тяговых и грузонесущих элементов [10].

Накопленный в рамках указанных исследований опыт позволяет предложить целостную систему теплового диагностирования ленточных конвейеров.

Целью настоящего исследования является разработка системы теплового диагностирования ленточных конвейеров, включающей перечень подготовительных мероприятий и непосредственно мероприятия при проведе-

нии диагностирования, а также общие подходы к оформлению результатов теплового контроля.

Система теплового диагностирования

Проведенные в работах [7–11] экспериментальные исследования, ориентированные на изучение работы различных элементов конвейеров, сопровождались совокупностью типовых (в ряде случаев одинаковых) обстоятельств и условий проведения испытаний, что позволяет сформулировать следующие базовые положения общей методики теплового диагностирования ленточных конвейеров [10].

1. Подготовку и проведение теплового контроля целесообразно осуществлять в соответствии с рекомендациями [6].

2. При изучении результатов теплового контроля во всех экспериментальных исследованиях проводится сравнительный анализ собственных температурных значений отдельно для каждого объекта контроля, вследствие чего при представлении результатов обработки данных отсутствует необходимость приведения температур с использованием коэффициента излучения поверхностей.

3. При проведении теплового контроля в сравнительной постановке для каждого отдельного объекта необходимо учитывать качество его поверхностного слоя (отсутствие нарушения лакокрасочных покрытий, применение последовательно сменяющих друг друга покрытий разных цветов и текстуры, что в рамках сравнительного анализа одного объекта приведет к погрешностям из-за различий коэффициента излучения поверхности).

4. Коэффициент излучения поверхности является величиной справочной и усредненной, поэтому при необходимости учета абсолютных значений температур поверхностей элементов конвейеров (при проведении контроля в запыленных помещениях, в неблагоприятных климатических условиях) отношение к полученным результатам может быть доверительным, но критическим. Для принятия технических решений по результатам такого контроля, влекущих значительные

экономические затраты, целесообразно проводить дополнительные к тепловому контролю экспериментальные исследования. При этом в сравнительной постановке тепловой контроль является достаточным для получения общей картины работы узлов и элементов ленточных конвейеров.

5. В основу теплового контроля элементов ленточного конвейера положена идея выделения тепловой энергии в результате работы элементов ленточного конвейера и их взаимодействия друг с другом.

При осуществлении теплового контроля в сравнительной постановке необходимо иметь эталонные образцы результатов для сравнения с результатами диагностирования во время эксплуатации. Каждый эталонный образец результатов является уникальным для различных конвейеров, отражает особенности конструкции конкретной машины, особенности примененных материалов и покрытий с собственными значениями коэффициента излучения поверхности. Таким образом, целесообразно установить четыре базовые стадии теплового диагностирования любого конвейера [10].

1. Проведение тестового теплового контроля после предварительной сборки и обкатки конвейера внутри предприятия-изготовителя (в результате составляется тепловая карта работы конвейера в холостом режиме с указанием рабочих температур для каждого элемента). Тепловая карта представляет собой набор расшифрованных термограмм каждого узла конвейера, подлежащего тепловому контролю, с указанием температур характерных точек узла. В данном случае целесообразно установить обязательный количественный минимум таких характерных точек – суммарное количество поверхностей контроля в рамках одной тепловой фотографии, отличающихся применением различного материала и различного цвета поверхности. Тепловые фотографии целесообразно выполнять в позиции, которую беспрепятственно можно будет повторить при выполнении фотографии при реальной эксплуатации конвейера на объекте заказчика, что позволит более качественно сравнивать результаты диагностирования с эталонными значениями. Каждая тепловая фотография

должна сопровождаться данными о значении температуры воздуха окружающей среды в момент фотографирования.

2. Проведение тестового теплового контроля после сборки и обкатки конвейера внутри эксплуатирующего предприятия (в результате составляется тепловая карта работы конвейера в холостом режиме с указанием рабочих температур для каждого элемента в рамках условий эксплуатации). При сравнении тепловых карт вносятся корректировки в документы по эксплуатации в части уточнения рабочих температур узлов конвейера и окружающей среды в холостом режиме работы.

3. Проведение тестового теплового контроля после сборки и обкатки конвейера внутри эксплуатирующего предприятия под нагрузкой (в результате составляется тепловая карта работы конвейера в нагруженном режиме в рамках условий эксплуатации). При сравнении тепловых карт вносятся корректировки в документы по эксплуатации в части уточнения рабочих температур узлов конвейера при работе с номинальной производительностью.

4. Проведение периодического теплового контроля в процессе эксплуатации (в результате составляются тепловые карты работы конвейера в зависимости от сезонности, а также в условиях приработки и выхода из строя различных элементов). Сравнение тепловых карт периодического и тестового контроля позволяет создавать статистическую базу эксплуатационных данных, а также совершенствовать процессы планирования эксплуатации и ремонта, вносить корректировки в процесс проектирования.

С учетом наличия в различных конструкциях ленточных конвейеров типовых узлов можно сформировать поэтапную общую методику теплового диагностирования ленточного конвейера, включающую наименования диагностируемых узлов, цели исследования, пояснения к тепловому контролю, а также возможные профилактические и ремонтные мероприятия, проводимые по результатам диагностирования (табл. 1) [10].

Таблица 1

Общая методика теплового диагностирования ленточного конвейера

Узел конвейера	Цель исследования	Возможные профилактические и ремонтные мероприятия	Пояснения к тепловому контролю
Приводной барабан	1. Определение качества исполнения футеровки барабана [8]	Осуществление ремонта футеровки, её замена, подбор рационального материала футеровки и её соединения с поверхностью барабана (механическое, клеевое)	Изучение картины распределения температуры по поверхности работающего приводного барабана, определение максимального и минимального значения температуры [8]
	2. Определение качества исполнения опор барабана [8]	Корректировка выбора подшипников, корректировка процессов смазки опорных узлов, выбора и замены смазочных материалов	Измерение температурного уровня опорного узла, определение наиболее нагруженных опор по уровню теплового излучения [8], определение реальной эксплуатационной температуры опорных узлов
	3. Определение качества креплений приводного барабана к элементам става конвейера [8]	Осуществление своевременного ремонта элементов става конвейера и креплений (устранение трещин, замена болтов, шайб, гаек, винтов, шпилек и т.п.)	Повышенный тепловой уровень болтовых соединений свидетельствует об их ослаблении и наличии трения в результате вибраций привода; повышенный тепловой уровень в коротких сварных швах также может свидетельствовать о наличии трещин и трении между элементами в результате вибрации [8]
Зона контакта лент в районе промежуточного привода	1. Определение качества поперечного контакта грузонесущей и тяговой лент	Корректировка положения роликосопор в зоне промежуточного привода, корректировка формы применяемых роликов (бочкообразного профиля и т.п.); корректировка параметров грузочных устройств с целью стабилизации положения груза на ленте	Исследование тепловой картины равномерности распределения температуры по поверхности лент в поперечной ориентации в начале и в конце промежуточного привода [7]
	2. Уточнение условий работы грузонесущей и тяговых лент	Выбор типов лент при проектировании или корректировке выбора при замене согласно температурным режимам в области промежуточного привода (корректировка материалов обкладок и толщин)	Измерение температур поверхностей обкладок лент на участках сбегания и набегаания грузонесущей ленты на тяговую [7, 10]

Продолжение табл. 1

Узел конвейера	Цель исследования	Возможные профилактические и ремонтные мероприятия	Пояснения к тепловому контролю
Зоны контакта роlikоопор верхней и нижней ветви с лентами (в том числе на криволинейных участках)	1. Определение качества нагружения лент с позиции равномерного распределения груза в поперечной ориентации на роlikоопоре	Корректировка параметров загрузочных устройств с целью стабилизации положения груза на ленте	Исследование тепловой картины равномерности распределения температуры по поверхности лент в поперечной ориентации в зоне линейных роlikоопор (верхней и нижней ветвей конвейера) [7]
	2. Определение качества нагружения роlikоопор, равномерности нагружения обечаек роlikов	Корректировка положения роlikоопор, формы применяемых роlikов на конкретных участках трассы конвейера	Исследование тепловой картины равномерности распределения температуры по поверхностям роlikов (верхней и нижней ветвей конвейера) [7]
	3. Определение качества работы роlikов в роlikоопоре, определение качества работы опорных узлов роlikов	Корректировка и подбор роlikов в структуре роlikоопор с учетом особенностей температурных режимов работы их элементов (обечаек, опорных узлов, осей)	Выявление узлов с повышенной температурной нагрузкой (измерение температурного поля торцевых крышек роlikов, опорных подшипников, осей роlikов во время работы) [7]
	4. Определение качества креплений роlikов, роlikоопор и става конвейера	Осуществление своевременного ремонта элементов става конвейера и креплений (устранение трещин, замена болтов, шайб, гаек, винтов, шпилек и т.п.)	Повышенный тепловой уровень болтовых соединений свидетельствует об их ослаблении и наличии трения в результате вибрационного воздействия; повышенный тепловой уровень в коротких сварных швах также может свидетельствовать о наличии трещин и трении между элементами в результате вибрации [7]
Роlikоопоры дефлекторные, амортизирующие (в зоне загрузки), переходные	1. Определение параметров возможного прерывистого контакта лент и дефлекторных роlikов	Корректировка установки дефлекторных роlikов, центрирующих роlikоопор для снижения частоты контакта лент и дефлекторных роlikов	Измерение сравнительных величин температур поверхностей дефлекторных роlikов [7; 10; 11]

Продолжение табл. 1

Узел конвейера	Цель исследования	Возможные профилактические и ремонтные мероприятия	Пояснения к тепловому контролю
	2. Определение качества процесса загрузки (перегрузки в зоне приводов типа «ложный сброс»)	Корректировка параметров загрузочных (перегрузочных) устройств с целью более равномерной загрузки амортизирующих роликоопор	Исследование тепловой картины распределения температур в зоне амортизирующих роликоопор [7, 10, 11]
	3. Определение качества формирования желоба лент на переходных участках	Корректировка положения (углов наклона) боковых роликов переходных роликоопор с целью повышения качества контакта лент и роликов и снижения нагрузки на боковые поверхности лент	Приближенная сравнительная оценка нагружения бортов лент на основе тепловой картины поверхностей боковых роликов переходных роликоопор и поверхности ленты (бортов ленты) [7, 10, 11]
	4. Определение качества работы роликов в роликоопоре, определение качества работы опорных узлов роликов	Корректировка и подбор роликов в структуре роликоопор с учетом особенностей температурных режимов работы их элементов (обечаек, опорных узлов, осей)	Выявление узлов с повышенной температурной нагрузкой (измерение температурного поля торцевых крышек роликов, опорных подшипников, осей роликов во время работы) [7, 10, 11]
	5. Определение качества креплений роликов, роликоопор и става конвейера	Осуществление своевременного ремонта элементов става конвейера и креплений (устранений трещин, замена болтов, шайб, гаек, винтов, шпилек и т.п.)	Повышенный тепловой уровень болтовых соединений свидетельствует об их ослаблении и наличии трения в результате вибрационного воздействия; повышенный тепловой уровень в коротких сварных швах также может свидетельствовать о наличии трещин и трении между элементами в результате вибрации [7, 10, 11]
	Натяжные и отклоняющие барабаны	1. Определение качества исполнения опор барабана [8]	Корректировка выбора подшипников, корректировка процессов смазки опорных узлов, выбора и замены смазочных материалов

Продолжение табл. 1

Узел конвейера	Цель исследования	Возможные профилактические и ремонтные мероприятия	Пояснения к тепловому контролю
	2. Определение качества крепежных натяжных и отклоняющих барабанов к элементам става конвейера [8]	Осуществление своевременного ремонта элементов става конвейера и креплений (устранений трещин, замена болтов, шайб, гаек, винтов, шпилек и т.п.)	Повышенный тепловой уровень болтовых соединений свидетельствует об их ослаблении и наличии трения в результате вибрационного воздействия; повышенный тепловой уровень в коротких сварных швах также может свидетельствовать о наличии трещин и трении между элементами в результате вибрации [8]
Механическая часть привода	1. Определение качества работы муфт, редукторов, тормозов, остановов и других механических частей приводов	Корректировка выбора и возможной замены муфт, редукторов, тормозов или элементов тормоза, остановов; корректировка процессов смазки, выбора и замены смазочных материалов	Исследование тепловой картины распределения температур между элементами механической части привода при работе конвейера [9, 10]
	2. Определение качества крепежных элементов механической части привода к элементам става конвейера [9]	Осуществление своевременного ремонта элементов става конвейера и креплений (устранений трещин, замена болтов, шайб, гаек, винтов, шпилек и т.п.)	Повышенный тепловой уровень болтовых соединений свидетельствует об их ослаблении и наличии трения в результате вибрационного воздействия; повышенный тепловой уровень в коротких сварных швах также может свидетельствовать о наличии трещин и трении между элементами в результате вибрации [9]
Электродвигатель (гидродвигатель) привода	1. Определение качества работы системы охлаждения двигателя	Осуществление ремонтных мероприятий по устранению дефектов системы охлаждения, замена двигателя	Исследование тепловой картины распределения температур по поверхности двигателя привода при работе конвейера [9; 10]
	2. Определение качества крепежных элементов двигателя к элементам става конвейера [9]	Осуществление своевременного ремонта элементов става конвейера и креплений (устранений трещин, замена болтов, шайб, гаек, винтов, шпилек и т.п.)	Повышенный тепловой уровень болтовых соединений и коротких сварных швов свидетельствует об их ослаблении или разрушении (появлении трещин) и наличии трения в результате вибрационного воздействия [9]

Окончание табл. 1

Узел конвейера	Цель исследования	Возможные профилактические и ремонтные мероприятия	Пояснения к тепловому контролю
Элементы системы управления приводами	1 Определение качества работы элементов системы управления	Осуществление ремонтных мероприятий по замене элементов системы управления приводами, корректировке её настроек	Исследование тепловой картины распределения температур по поверхности частотных преобразователей, тормозных резисторов [9; 10; 11]
	2 Определение качества крепежных элементов двигателя к элементам става конвейера [9]	Осуществление своевременного ремонта элементов става конвейера и креплений (устранений трещин, замена болтов, шайб, гаек, винтов, шпилек и т.п.)	Повышенный тепловой уровень болтовых соединений и коротких сварных швов свидетельствует об их ослаблении или разрушении (появлении трещин) и наличии трения в результате вибрационного воздействия [9]

Предложенная в табл. 1 методика является гибкой и предполагает собственное дальнейшее развитие, уточнение и совершенствование с учетом накопления статистических данных в области тепловой диагностики элементов ленточных конвейеров, в том числе при их эксплуатации в различных климатических районах, а также при их взаимодействии со специфическими грузами.

Заключение

Приведенная в настоящей статье методика теплового диагностирования ленточных конвейеров обладает двумя оригинальными особенностями:

Список литературы

1. Лагерева А. В. Диагностика и дефектация подъемно-транспортного оборудования и крановых путей. Брянск: Брянский государственный технический университет, 2005. 155 с.
2. Реутов А.А. Монтаж, эксплуатация и ремонт ленточных конвейеров. Брянск: БГТУ, 2008. 104 с.
3. Зорин В.А., Косенко Е.А., Домогаев А.Ю. Применение инфракрасной термографии при дефектоскопии рукавов высокого давления гидросистем дорожно-строительных машин // Грузовик. 2019. №

1) организацией контроля с постоянным обновлением и регулярным анализом тепловых карт, структура и процедура составления которых должны жестко регламентироваться нормативными документами различных уровней;

2) четко обозначенными рекомендациями в области контроля конкретных узлов конвейера, составленными на основе результатов проведенных экспериментальных исследований.

Внедрение описанных в статье диагностических подходов при эксплуатации ленточных конвейеров может способствовать повышению качества процесса диагностирования и продлению сроков их эксплуатации.

References

1. Lagerev A.V. Diagnostika i defektatsia podemno-transportnogo oborudovaniya i kranovykh putey. Bryansk, BSTU, 2005. 155 p. (In Russian)
2. Reutov A.A. Montazh, ekspluatatsia i remont lentochnykh konveyerov. Bryansk, BSTU, 2008. 104 p. (In Russian)
3. Zorin V.A., Kosenko E.A., Domogarov A.Yu. The application of infrared thermography during the inspection of high pressure hoses of hydraulic systems of road construction machines. *Gruzovik*, 2019, No.3, pp. 23-25. (In Russian)

3. С. 23-25.

4. Косенко Е.А., Зорин В.А., Баурова Н.И. Анализ влияния постоянного магнитного поля на результаты контроля качества деталей из полимерных материалов методом инфракрасной термографии // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2018. № 7. С. 30-33.

5. Гончаров К.А., Гришин А.В. Экспериментальный стенд для исследования влияния конструкции промежуточного ленточного привода ленточного конвейера на его рабочие процессы // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2017. №1. С.52–59. DOI:10.22281/2413-9920-2017-03-01-52-59

6. Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах (РД-13-04-2006). Серия 28. Выпуск 11. М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2010. 32 с.

7. Гончаров К.А. Анализ взаимодействия грузонесущей и тяговой лент промежуточного привода ленточного конвейера // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С.426–432. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-426-432

8. Гончаров К.А., Гришин А.В. Экспериментальное исследование теплового режима работы мотор-барабана короткого ленточного конвейера // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. № 4. С. 529-538. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-529-538

9. Гончаров, К. А. Экспериментальное исследование температурных режимов продолжительной работы электропривода подъемно-транспортных машин // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 3. С. 296-302. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-03-296-302

10. Гончаров К.А. Тяговый расчет многоприводных ленточных конвейеров. Курск: Закрытое акционерное общество

4. Kosenko E.A., Zorin V.A., Baurova N.I. Analysis of constant magnetic field effect on results of quality control of polymer material components by infrared thermography method *Vse materialy. Entsiklopedicheskii spravochnik*, 2018, No.7, pp. 30-33. (In Russian)

5. Goncharov K.A., Grishin A.V. Experimental test bench for the study of impact of intermediate belt drive construction of belt conveyor on its operation. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.1, pp. 52-59. DOI:10.22281/2413-9920-2017-03-01-52-59 (In Russian)

6. Metodicheskie rekomendatsii o poryadke provedeniya teplovogo kontrolya tekhnicheskikh ustroystv i sooruzheniy, primenyaemykh i expluatiruemykh na opasnykh proizvodstvennykh obyektakh (RD-13-04-2006). Serya 28. Vypusk 11. Moscow, ZAO «Nauchno-tekhnicheskii Tsentр issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti», 2010. 32 p. (In Russian)

7. Goncharov K.A. Analysis of tractive and carrying belts interaction of intermediate drive of belt conveyor. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 426-432. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-426-432 (In Russian)

8. Goncharov K.A., Grishin A.V. Experimental study of operation heat mode of the motor drum of a short belt conveyor. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.4, pp. 529-538. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-529-538 (In Russian)

9. Goncharov K.A. Investigative study of temperature conditions of continuous run modes of hoisting machine electric drive. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.3, pp. 296-302. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-03-296-302 (In Russian)

10. Goncharov K.A. Tyagovyy raschet mnogoprivodnykh lentochnykh konveyerov [Traction calculation of multi-drive belt conveyor]. Kursk, ZAO Universitetskaya kniga, 2021. 271 p. (In Russian)

"Университетская книга", 2021. 271 с.

11. Лагереv А.В., Толкачев Е.Н., Гончаров К.А. Моделирование рабочих процессов и проектирование многоприводных ленточных конвейеров. Брянск: РИО БГУ, 2017. 384 с. DOI:10.5281/zenodo.1196612

† 11. Lagerev A.V., Tolkachev E.N.,
† Goncharov K.A. Modelirovanie rabochikh
† protsessov i proektirovanie mnogoprivodnykh
† lentochnykh konveyerov [Modeling of work
† processes and the design of multi-drive belt
† conveyor]. Bryansk, RIO BGU, 2017. 384 p.
† DOI:10.5281/zenodo.1196612 (In Russian)
†

УДК (UDC) 625.1/.5

**ОБЩИЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ МОБИЛЬНЫХ
КАНАТНЫХ ДОРОГ НА ОСНОВЕ МОБИЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНО-
ПЕРЕГРУЗОЧНЫХ КАНАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ****A GENERAL APPROACH TO THE CREATION OF DIGITAL TWINS OF MOBILE
ROPEWAYS BASED ON MOBILE TRANSPORT AND RELOADING ROPE UNITS**Лагереv А.В., Лагереv И.А.
Lagerev A.V., Lagerev I.A.Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)
Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. В статье рассмотрен концептуальный подход и практические аспекты создания цифровых двойников мобильных канатных дорог, формируемых двумя концевыми мобильными транспортно-перегрузочными канатными комплексами на базе самоходных многоосных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости. Подход основан на системном представлении и анализе конструктивного исполнения и режимов эксплуатации мобильной канатной дороги. Как следствие, цифровой двойник формируется как многоуровневая иерархическая структура. Она объединяет информационные математические модели различного функционального назначения и различной степени взаимной связности, которые распределены по уровням в зависимости от степени сложности и возможности их дальнейшего агрегирования в информационные математические модели более высокого уровня. Применительно к типичной мобильной канатной дороге проведен структурно-функциональный анализ, на основе которого установлены ее базовые компоненты, а также определены расчетные структурные элементы (технические устройства и системы), требующие разработки необходимых индивидуальных информационных математических моделей. Рассмотрены подходы к агрегированию нескольких индивидуальных моделей расчетных элементов, связанных общими характерными количественными параметрами моделирования, в групповые информационные математические модели, а затем – в режимные и полные информационные математические модели структурно-функциональных компонентов мобильной канатной дороги. Рассмотренный в статье системный подход и разработанная на его основе многоуровневая иерархическая структура цифрового двойника полезны и эффективны с точки зрения обеспечения модульности создания цифрового двойника, его модификации для мобильных канатных дорог иного конструктивного исполнения, возможности использования ранее разработанных информационных математических моделей для аналогичных расчетных структурных элементов.

Abstract. The article considers the conceptual approach and practical aspects of creating digital twins of mobile ropeways formed by two end mobile transport and reloading rope units based on self-propelled multi-axle wheeled chassis of high load capacity and cross-country ability. The approach is based on a systematic representation and analysis of the design and operating modes of a mobile ropeway. As a consequence, the digital twin is formed as a multilevel hierarchical structure. It combines information mathematical models of various functional purposes and varying degrees of mutual connectivity, which are distributed by levels depending on the degree of complexity and the possibility of their further aggregation into information mathematical models of a higher level. In relation to a typical mobile ropeway, a structural and functional analysis was carried out, on the basis of which its basic components were established, and calculated structural elements (technical devices and systems) were determined, requiring the development of the necessary individual information mathematical models. Approaches to aggregation of several individual models of computational elements connected by common characteristic quantitative parameters of modeling into group information mathematical models, and then into mode and complete information mathematical models of structural and functional components of a mobile ropeway are considered. The system approach considered in the article and the multilevel hierarchical structure of the digital twin developed on its basis are useful and effective from the point of view of ensuring the modularity of creating a digital twin, its modification for mobile ropeways of a different design, the possibility of using previously developed information mathematical models for similar computational structural elements.

Ключевые слова: мобильная канатная дорога, цифровой двойник, системный анализ, информационная математическая модель, проектирование.

Дата принятия к публикации: 10.02.2022
Дата публикации: 25.03.2022

Сведения об авторах:

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

ORCID: 0000-0003-0380-5456

Лагерев Игорь Александрович – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-0921-6831

Keywords: mobile ropeway, digital twin, systems analysis, information mathematical model, design.

Date of acceptance for publication: 10.02.2022
Date of publication: 25.03.2022

Authors' information:

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

ORCID: 0000-0003-0380-5456

Igor A. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Vice rector for Innovations, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University, e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-0921-6831

Благодарности

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

Acknowledgements

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

1. Введение

Канатные транспортно-логистические системы в виде стационарных подвесных или буксировочных канатных дорог нашли достаточно широкое применение для организации перевозки грузов и пассажиров в горной, лесистой, труднодоступной или экологически уязвимой местности [1, 2]. Они достаточно активно используются в странах Европы, включая Россию, Латинской Америки, Азии. В настоящее время этот вид транспорта рассматривается как перспективный для использования при организации пассажирских и грузовых перевозок также в условиях сильно урбанизированной среды – в пределах крупных городов и городских агломераций [3, 4].

Параллельно с развитием новых конструкций традиционных стационарных подвесных канатных дорог в России и за рубежом ведутся научные и прикладные исследования по созданию канатных транспортных систем нового поколения. Эволюция канатных дорог идет двумя путями:

- путем создания пассажирских городских канатных систем, в частности, систем типа «Канатное метро» [5] на основе исполь-

зования современных мехатронных и многоканатных автоматизировано управляемых систем;

- путем создания мобильных канатных дорог на основе самоходных колесных или гусеничных шасси или прицепов высокой грузоподъемности и проходимости, в частности, трелевочных канатных установок [6] или мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов [7].

Мобильные канатные комплексы имеют многоцелевое назначение. Они могут быть эффективным средством для выполнения транспортно-логистических операций при строительстве объектов (доставка материалов, технологического оборудования, людей и т.п.), разового проведения транспортно-перегрузочных мероприятий при минимальном времени монтажа/демонтажа транспортной системы или проведении горно-добывающих и лесохозяйственных работ на заранее не обустроенных территориях со сложным рельефом (горная или сильно пересеченная местность и т.д.) [7]. Однако они также могут использоваться при проведении аварийно-спасательных операций в зонах чрезвычайных ситуаций природного или техногенного характера, в зонах военных или антитеррори-

стических операций для оперативной переброски необходимых сил и средств, для освоения Арктики, включая транспортное обслуживание судов снабжения [8].

Для создания современных конкурентоспособных конструкций машин и оборудования отечественного производства для мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, обладающих высокими техническими, экономическими и экологическими характеристиками, требуется создание как научно обоснованной теории исследования рабочих процессов данного вида транспорта, так и разработка новых компьютеризированных методов проектирования, экспериментальной отработки опытных образцов и мониторинга в процессе дальнейшей эксплуатации.

В рамках осуществляющегося в настоящее время во всех отраслях промышленности перехода к технологиям Индустрии 4.0 при решении указанных технических задач целесообразно использовать такой перспективный подход к совершенствованию проектирования сложных технических систем, как цифровых двойников объектов или процессов [9, 10].

Мобильные канатные дороги являются идеальным объектом для создания таких

цифровых двойников [11]. Развивая исследование, начатое в [11], в данной статье рассмотрен концептуальный подход и практические аспекты создания цифровых двойников мобильных канатных дорог, формируемых двумя концевыми мобильными транспортно-перегрузочными канатными комплексами на базе самоходных многоосных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости.

2. Структурно-функциональный анализ мобильной канатной дороги

2.1. Общая структурная схема мобильной канатной дороги

Схема мобильной канатной дороги, формируемой двумя сопряженными посредством канатной системы мобильными транспортно-перегрузочными канатными комплексами на базе самоходных колесных или гусеничных специальных шасси или тяжелых буксируемых прицепов повышенной грузоподъемности и проходимости, которая обеспечивает необходимые транспортно-логистические грузовые и пассажирские операции, показана на рис. 1 [7].

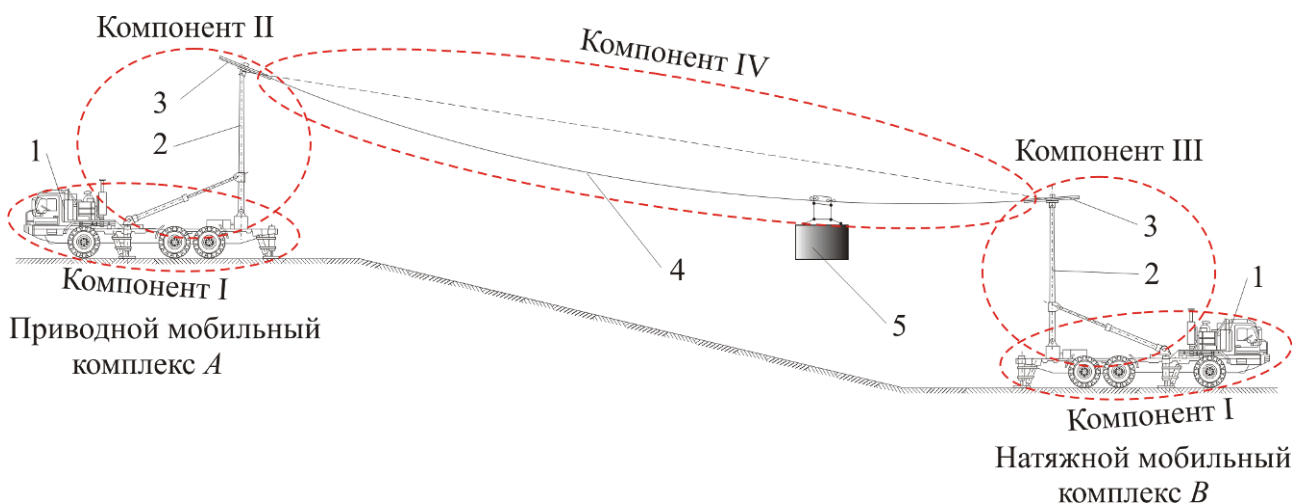


Рис. 1. Схема мобильной канатной дороги на основе двух концевых мобильных комплексов: 1 – концевая опора; 2 – канатный шкив; 3 – несущий-тяговый канат; 4 – транспортируемый груз на подвеске

В общем случае мобильная канатная дорога состоит из двух сопряженных концевых мобильных комплексов (базовых станций) А

и В, установленных в конечных точках трассы. На оголовках концевых опор 1 установлены канатные шкивы 2 с тяговым и натяж-

ным механизмами. В процессе эксплуатации работает лишь один из этих механизмов, а другой отключен. Как следствие, один из концевых мобильных комплексов обеспечивает перемещение несущего-тягового каната с закрепленным на нем с помощью подвески транспортируемым грузом 4, а второй – необходимое натяжение несущего-тягового каната.

Таким образом, рассмотренный вариант конструктивного исполнения мобильной канатной дороги в процессе ее эксплуатации состоит из следующих структурно-функциональных компонентов:

- самоходного шасси мобильного комплекса (компонент I на рис. 1);
- основного технологического оборудования приводного мобильного комплекса (компонент II на рис. 1);
- основного технологического оборудования натяжного мобильного комплекса (компонент III на рис. 1);
- канатной системы (компонент IV на рис. 1).

В состав комплекта мобильной канатной дороги также входит дополнительное технологическое оборудование, в частности, устройства торможения, демпфирования продольных и поперечных колебаний подвижного состава, контроля положения тягового и несущего канатов и др.

Представленная на рис. 1 мобильная канатная дорога маятникового типа с одиночным несущим-тяговым канатом является наиболее простой по конструктивному исполнению и номенклатуре используемых узлов и механизмов. Однако возможны другие альтернативные варианты конструктивного исполнения мобильных канатных дорог на основе двух концевых мобильных комплексов, каждый из которых обладает как определенными технико-экономическими преимуществами, так и недостатками. Указанные варианты отличаются особенностями компоновки основного технологического оборудования (в первую очередь, особенностями размещения и фиксации в рабочем положении концевых опор) и особенностями конструкции их канатной системы, состоящей из совокупности несущих, тяговых или несущих-тяговых канатов [7].

Тем не менее, для всех известных конструктивных разновидностей мобильных дорог на основе двух концевых мобильных комплексов рассмотренные далее принципы, лежащие в основе общий подход к созданию цифровых двойников, остаются неизменными.

2.2. Расчетные структурные элементы мобильной канатной дороги

Совокупность структурных элементов мобильной канатной дороги в целом складывается из совокупности структурных элементов каждого из четырех выявленных структурно-функциональных компонентов (рис. 1). При этом, исходя из принципа унификации промышленной продукции, компоненты II и III следует считать конструктивно, структурно и функционально идентичными, т.е. любой из этих компонентов в процессе эксплуатации мобильной канатной дороги может выполнять как функции приводного мобильного комплекса, так и функции натяжного мобильного комплекса.

Детализация конструкции структурно-функциональных компонентов мобильной канатной дороги позволяет выявить значительное число конструктивных элементов – устройств и систем, которые так или иначе оказываются необходимыми для экономической, надежной и безопасной эксплуатации дороги. Исчерпывающий список этих элементов определяется содержанием спецификаций на изделия машиностроения и приборостроения, разработанных на стадии проектирования компонентов мобильной канатной дороги. Очевидно, не все конструктивные элементы целесообразно принимать во внимание при создании цифровых двойников. Однако обязателен учет тех элементов, которые вносят вклад в формирование рабочих процессов различной физической природы, протекающих при эксплуатации мобильной канатной дороги в целом и ее отдельных компонентов. В числе подлежащих учету первостепенных рабочих процессов можно отметить такие, как формирование нестационарного напряженно-деформированного и вибронапряженного состояний, повреждаемости и деградации несущих конструкций, динами-

ка и колебания конструкций, узлов и канатов, гидро- или пневмодинамические процессы в гидро- или пневмоприводах механизмов движения и др. Такие конструктивные элементы должны рассматриваться как расчетные структурные элементы и их учет в той или иной степени должен быть выполнен при создании цифрового двойника.

Процедура выявления всех расчетных структурных элементов, учет которых обеспечивает качество результатов использования цифрового двойника, основывается на четком представлении, в первую очередь, особенностей конструкции и функционирования при выполнении всех основных рабочих и вспомогательных технологических операций структурно-функциональных компонентов мобильной канатной дороги. С этой целью необходимо провести структурно-функциональный анализ перспективных вариантов конструктивного исполнения мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Такие перспективные варианты мобильных комплексов на базе самоходных колесных многоосных шасси высокой грузоподъемности и проходимости, защищенные патентами РФ, достаточно подробно рассмотрены в [7, 12].

В качестве конкретного примера, иллюстрирующего процедуру выявления расчетных структурных элементов мобильной канатной дороги, рассмотрим вариант конструктивного исполнения мобильного комплекса с центральным расположением концевой опоры и ее фиксацией в рабочем положении с помощью приводного силового гидроцилиндра [13], защищенного патентом РФ № 200827 [14]. Общий вид мобильного комплекса показан на рис. 2 и 3 [7, 13].

На надрамной конструкции 1, установленной на несущей раме 2 самоходного колесного шасси, своим нижним концом закреплена концевая опора 4. Узел ее крепления представляет собой цилиндрический шарнир, что концевой опоре поворотное движение в вертикальной плоскости, совпадающей с продольной осью мобильного шасси, на угол α не более 120° . К нижней части концевой опоры с помощью цилиндрического шарнира крепится шток 8 подъ-

емного гидроцилиндра 9. Корпус подъемного гидроцилиндра с помощью цилиндрического шарнира крепится к надрамной конструкции. Возможно использование как одиночного подъемного гидроцилиндра, так и сдвоенных параллельно установленных и синхронно работающих гидроцилиндров одинакового типоразмера (рис. 3). К оголовку концевой опоры крепится механизм поворота канатного шкива (элемент I на рис. 2, б). Конструктивные элементы механизма поворота закреплены на раме 14. На этой же раме закреплен гидромотор механизма перемещения несущего каната, к которому подается рабочая жидкость от гидравлического насоса гидросистемы мобильного комплекса. Выходной вал гидромотора посредством трансмиссии, включающей червячный редуктор 23, кинематически связан с приводным валом 25, на конце которого закреплен канатный шкив 26. В профилированном ручье канатного шкива располагается несущий канат 27.

К месту назначения мобильный комплекс выдвигается, имея концевую опору в транспортном положении (рис. 2, а). При достижении места назначения мобильный комплекс ориентируется так, чтобы продольная ось мобильного шасси совпадала с продольной осью канатной дороги. Использование промежуточных опор не предусматривается, то есть формируется однопролетная грузовая канатная дорога маятникового типа. Для обеспечения общей устойчивости в условиях действия значительных горизонтальных опрокидывающих нагрузок от силы натяжения несущего каната и транспортируемого груза самоходная концевая станция выставляется на аутригеры (выносные опоры), которые закрепляются в грунте с помощью дополнительных анкерных устройств. В их качестве могут быть использованы известные конструкции аутригеров с анкерными устройствами [15]). Установка концевой опоры производится в два этапа в связи с необходимостью согласования взаимного расположения канатных шкивов сопрягаемых мобильных комплексов при их объединении в единую канатную транспортную систему с помощью общего несущего каната.

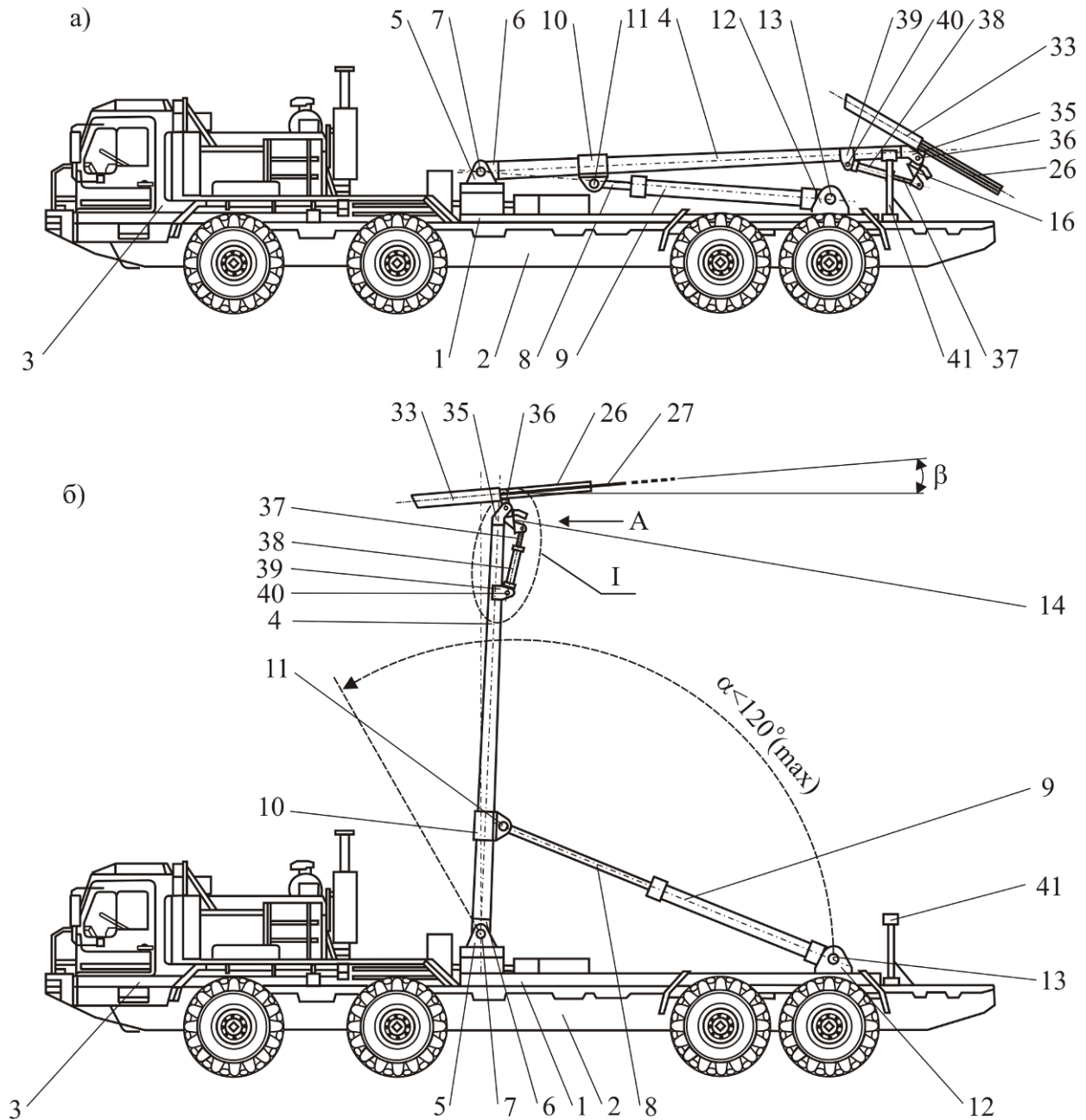


Рис. 2. Общий вид мобильного комплекса (вид сбоку) [7, 13]: а – транспортное положение концевой опоры; б – рабочее положение концевой опоры

(1 - надрамная конструкция; 2 - несущая рама; 3 - самоходное колесное шасси (самоходная концевая станция мобильной канатной дороги); 4 - концевая опора; 5, 6 – проушина; 7, 11, 13, 36, 40 - шарнирный палец; 8, 37 – шток; 9 - подъемный гидроцилиндр; 10, 12, 18, 35, 39 - профилированная проушина; 14 – рама; 15 - горизонтальная пластина; 16 - вертикальная пластина; 17 - ребро жесткости; 19, 31 - болт; 20 – гидромотор; 21 - штуцер; 22, 24 – муфта; 23 - червячный редуктор; 25 - приводной вал; 26 - канатный шкив; 27 - несуще-тяговый канат; 28 - упорный роликоподшипник; 29 - сферический радиальный шарикоподшипник; 30 – стакан; 32 - торцевая крышка; 33 - предохранительный кожух; 34 – полуось; 38 - поворотный гидроцилиндр; 41 - транспортная стойка; 42 – крепежная втулка; элемент I – механизм поворота канатного шкива)

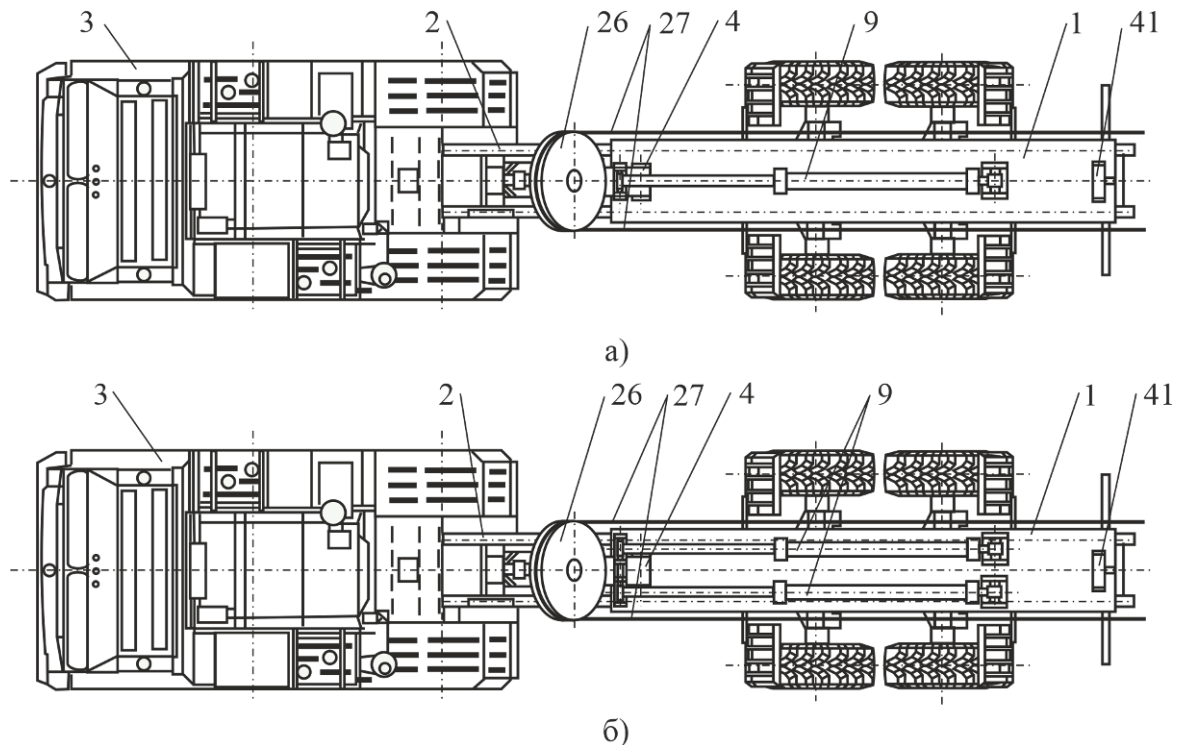


Рис. 3. Общий вид мобильного комплекса (вид сверху) [13]: а – с одинарным подъемным гидроцилиндром; б – со сдвоенными подъемными гидроцилиндрами

На первом этапе установки, который носит предварительный характер, закольцованный несущее-тяговый канат размещается в ручье канатного шкива. При этом предохранительный кожух обеспечивает надежную фиксацию несущее-тягового каната, исключая возможность его соскакивания с канатного шкива в процессе дальнейшего перемещения концевой опоры из транспортного в рабочее положение. Путем выдвигания штока подъемного гидроцилиндра, в который по напорным трубопроводам подается под давлением рабочая жидкость из гидросистемы мобильного комплекса, концевая опора предварительно поворачивается на приблизительно требуемый угол α . Величина этого угла определяется, исходя из взаимного высотного расположения на местности мобильных комплексов. Если соседний мобильный комплекс расположен выше, то, как правило, угол α должен быть не менее 90° , в противном случае угол α должен быть не более 90° . Далее путем выдвигания штока поворотного гидроцилиндра рама механизма поворота канатного шкива, а вместе с ней и сам канатный шкив предварительно поворачиваются относительно продольной оси концевой опо-

ры на приблизительно требуемый угол, не превышающий 90° . Этот угол определяется, исходя из необходимости соответствия угла наклона к горизонту плоскости канатного шкива и угла наклона к горизонту продольной оси несущее-тягового каната при установке обоих мобильных комплексов в рабочее положение. На втором этапе установки концевой опоры, который носит регулируемый характер, путем дополнительного (корректирующего) выдвигания штока подъемного гидроцилиндра концевая опора поворачивается в пределах нескольких градусов, что приводит к получению окончательного значения требуемого угла α . Дополнительный поворот канатного шкива обеспечивает точное согласование расположения продольной оси несущее-тягового каната плоскости канатного шкива, что исключает повышенный износ профилированного ручья шкива и самого каната, повышает ресурс работы элементов канатной системы мобильной канатной дороги и безопасность ее эксплуатации. Механизм движения несущее-тягового каната приводного мобильного комплекса обеспечивает маятниковое перемещение транспортируемых грузов вдоль

трассы канатной дороги. Механизм натяжения несущего-тягового каната приводного мобильного комплекса обеспечивает его оптимальное натяжение в соответствии с известными рекомендациями [16].

В качестве структурно-функционального компонента I мобильной канатной дороги (т.е. самоходного шасси мобильного комплекса) целесообразно рассматривать возможность использования уже известные и выпускаемые отечественной или зарубежной автомобильной промышленностью самоходные шасси. Колесные машины высокой проходимости и грузоподъемности гражданского, военного и многоцелевого назначения проектируются и выпускаются крупными машиностроительными предприятиями ряда

промышленно развитых стран, включая Россию (ПАО «КАМАЗ», АО «Брянский автомобильный завод», АО «Уральский автомобильный завод», АО «Заволжский завод гусеничных тягачей»), Беларусь (ОАО «Минский автомобильный завод», ОАО «Минский завод колесных тягачей»), Германию (MAN SE, Daymler AG), Италию (Iveco), Китай (Dongfeng, FAW), Нидерланды (DAF), США (FreightLiner, Caterpillar), Францию (Renault), Чехию (Tatra), Швецию (Volvo AB, Scania AB), Японию (Mitsubishi) [15, 17]. На рис. 4 показан характерный общий вид многоосного колесного шасси, пригодного для размещения основного технологического оборудования (компонентов II и III мобильной канатной дороги).

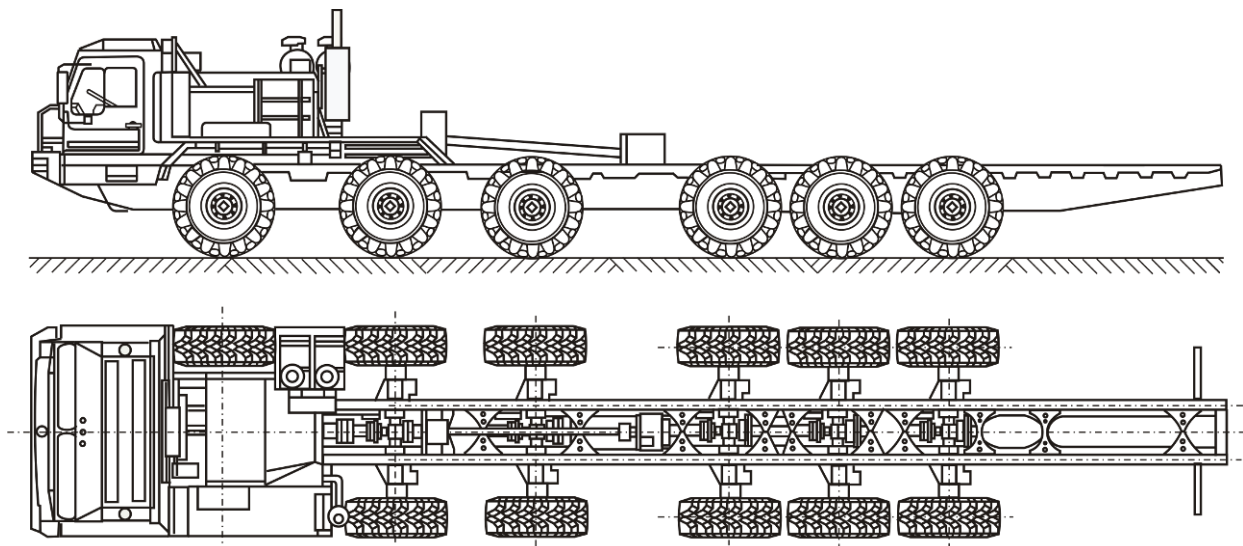


Рис. 4. Общий вид 6-осного колесного шасси высокой грузоподъемности и проходимости

При разработке той части цифрового двойника мобильной канатной дороги, которая касается компонента I, наиболее эффективным является использование ранее разработанного цифрового двойника самоходного колесного шасси (если такая возможность имеется), интегрировав его в общую структуру цифрового двойника мобильной канатной дороги. При отсутствии возможности использования известного цифрового двойника компонента I его необходимо создавать с учетом конструкции и состава механизмов и систем выбранного самоходного шасси. В этом случае целесообразно ориентироваться на имеющуюся проектно-конструкторскую документацию и научно-техническую литературу,

например, на работы [18–26]. Укрупнено в качестве расчетных элементов компонента I мобильной канатной дороги должны выступать такие, как:

- силовая установка (\mathcal{E}_{cy});
- несущая рама (\mathcal{E}_{np});
- трансмиссия (\mathcal{E}_{tm});
- устройство отбора мощности для работы основного технологического оборудования мобильной канатной дороги (\mathcal{E}_{om});
- ходовая часть (\mathcal{E}_{xc});
- рулевое управление (\mathcal{E}_{py});
- тормозная система (\mathcal{E}_{tc});
- кабина водителя (\mathcal{E}_{kb});
- электрооборудование ($\mathcal{E}_{эо}$);
- система кондиционирования ($\mathcal{E}_{ск}$);

- выносные опоры ($\mathcal{E}_{\text{во}}$).

Учитывая целесообразность производственной унификации компонентов II и III мобильной канатной дороги (т.е. основного технологического оборудования приводного и натяжного мобильных комплексов) и известные перспективные конструкции основного технологического оборудования мобильных канатных дорог [7, 12, 13, 27, 28], в качестве расчетных элементов структурно-функциональных компонентов II и III должны выступать такие элементы, как:

- концевая опора ($\mathcal{E}_{\text{ко}}$);

- насосная система ($\mathcal{E}_{\text{нс}}$), обеспечивающая работу всех гидравлических приводов и устройств мобильного комплекса;

- механизм установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении ($\mathcal{E}_{\text{уф}}$), обеспечивающий подъем опоры из транспортно-го положения в рабочее положение для обеспечения требуемого высотного расположения канатной системы;

- механизм перемещения несущего тягового каната (приводной механизм) ($\mathcal{E}_{\text{пк}}$), обеспечивающий маятниковое движение транспортируемых грузов;

- механизм пространственной ориентации канатного шкива ($\mathcal{E}_{\text{по}}$), обеспечивающий взаимную параллельность продольных осей ручья канатного шкива и каната с учетом естественного провисания каната под нагрузкой во время эксплуатации;

- механизм натяжения несущего тягового каната ($\mathcal{E}_{\text{нк}}$), обеспечивающий оптимальное натяжение каната во время эксплуатации мобильного канатной дороги;

- система управления ($\mathcal{E}_{\text{уп}}$), обеспечивающая работу и мониторинг всех узлов, устройств и приборов основного технологического оборудования;

- тормозной механизм ($\mathcal{E}_{\text{тм}}$), исключающий самопрокидывание концевой опоры при ее переводе из транспортного в рабочее положение;

- дополнительные устройства, механизмы и системы ($\mathcal{E}_{\text{ду}}$), необходимые с учетом специфических конструктивных особенностей основного технологического оборудования (например, механизм канатной или канатно-гидравлической фиксации концевой опоры,

шарнирно-сочлененная штанга механизма подъема и фиксации концевой опоры, механизм предварительного подъема концевой опоры, устройство расчаливания концевой опоры и др. [7]).

Анализ существующих вариантов конструктивного исполнения канатных систем стационарных и мобильных грузовых и пассажирских канатных дорог, в частности, представленных в [7, 29-32], в качестве расчетных элементов структурно-функционального компонента IV мобильной канатной дороги (т.е. канатной системы) должны выступать такие элементы, как:

- несущий, тяговый или несущего-тяговый канат ($\mathcal{E}_{\text{кт}}$);

- устройство для подвешивания транспортируемого груза ($\mathcal{E}_{\text{пг}}$);

- контрольно-диагностическая система мониторинга канатной системы ($\mathcal{E}_{\text{см}}$), обеспечивающая постоянный контроль величин ее кинематических и силовых параметров;

- система безопасности движения транспортируемого груза ($\mathcal{E}_{\text{сб}}$), обеспечивающая предотвращения возможных аварийных ситуаций вследствие вертикальных колебаний и ветрового раскачивания груза, дефектного крепления груза, отклонения режима торможения груза в точке останова, повреждения несущего каната и др.

При создании цифрового двойника мобильной канатной дороги в число расчетных элементов необходимо также дополнительно включить такие вспомогательные элементы, как:

- транспортируемый груз ($\mathcal{E}_{\text{тг}}$);

- опорная поверхность ($\mathcal{E}_{\text{оп}}$), обеспечивающая размещение и анкерровку мобильного комплекса;

- окружающая среда ($\mathcal{E}_{\text{ос}}$);

- особые процессы природного или техногенного характера ($\mathcal{E}_{\text{ап}}$), возникновение которых при эксплуатации мобильной канатной дороги приводит к нештатной или аварийной работе компонентов.

Эти расчетные элементы обеспечивают оценку необходимых исходных данных (в дополнение к исходным данным, непосредственно фиксируемых средствами объективного контроля) об условиях эксплуатации

мобильной канатной дороги, которые используются при моделировании рабочих процессов в основных, расчетных элементах.

2.3. Режимы эксплуатации мобильной канатной дороги

В процессе полного цикла эксплуатации мобильной канатной дороги структурно-функциональные компоненты могут выполнять различные функции с различными параметрами внешнего воздействия. Детализация во времени этих функций, физической природы и уровней внешнего воздействия позволяет выявить следующие штатные и нештатные режимы работы, требующие индивидуального рассмотрения при создании цифрового двойника мобильной канатной дороги.

Штатные режимы эксплуатации мобильной канатной дороги:

- режим транспортировки мобильного комплекса к месту развертывания (режим Рт);
- режим установки и фиксации концевой опоры мобильного комплекса в рабочем положении (режим Рм);
- режим навешивания канатной системы (режим Рн);
- рабочий режим мобильной канатной дороги (режим Рр);
- режим демонтажа канатной системы (режим Рд);
- режим перевода основного технологического оборудования мобильного комплекса в транспортное положение (режим Рп).

Нештатный режим эксплуатации мобильной канатной дороги:

- аварийный режим работы мобильной канатной дороги (режим Ра).

В табл. 1 приведены данные о возможном функционировании расчетных элементов при различных штатных режимах эксплуатации мобильной канатной дороги.

Режим транспортировки мобильного комплекса к месту развертывания (режим Рт) определяет рабочие процессы, происходящие в расчетных элементах компонента I мобильной канатной дороги (табл. 1). Он характеризуется случайным чередованием ос-

новных режимов движения самоходного шасси, в числе которых целесообразно рассматривать такие, как [33]:

- стоянку;
- разгон;
- движение с постоянной скоростью;
- притормаживание;
- полное служебное торможение;
- экстренное торможение.

Расчетные элементы структурно-функциональных компонентов II и III мобильной канатной дороги во время режима Рт не функционируют. Часть из них, преимущественно конструктивно связанные с несущей металлоконструкцией концевой опоры, занимают транспортное положение. Это обусловлено необходимостью соблюдения высотным габаритом мобильного комплекса требования нормативного габарита приближения по высоте с учетом требуемых зазоров [34], необходимого для безопасного проезда под мостовыми сооружениями и путепроводами при движении мобильного комплекса по автомобильным дорогам общего пользования, или максимального вертикального размера габарита подвижного состава [35], необходимого для безопасной перевозки мобильного комплекса железнодорожным транспортом. Расчетные элементы, подпадающие под требования безопасности автомобильной и железнодорожной транспортировки, и их транспортное положение на несущей раме самоходного шасси определяются по результатам предварительной компоновки основного технологического оборудования в зависимости от конструктивных особенностей крепления концевой опоры и способа ее перевода в рабочее положение [7, 12, 13, 27, 28].

Режим установки и фиксации концевой опоры мобильного комплекса в рабочем положении (режим Рм) и режим перевода основного технологического оборудования мобильного комплекса в транспортное положение (режим Рп) требуют функционирования, главным образом, таких расчетных элементов, как:

- силовая установка и устройство отбора мощности, обеспечивающие энергетические потребности компонентов II и III;

Таблица 1

Матрица признаков работы расчетных элементов при штатных режимах эксплуатации
мобильной канатной дороги

Компонент	Расчетный элемент	Признак работы элемента при режиме					
		РГ	РМ	РН	Рр	Рд	Рп
I	Силовая установка	+	+	+	+	+	+
	Несущая рама	+	+	+	+	+	+
	Трансмиссия	+	-	-	-	-	-
	Устройство отбора мощности	-	+	+	+	+	+
	Ходовая часть	+	-	-	-	-	-
	Тормозная система	+	-	-	-	-	-
	Кабина водителя	+	+	+	+	+	+
	Электрооборудование	+	+	+	+	+	+
	Система кондиционирования	+	-	-	+	-	-
	Выносные опоры	-	+	+	+	+	+
II, III	Концевая опора	-	+	+	+	+	+
	Насосная система	-	+	+	+	+	+
	Механизм установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении	-	+	+	+	+	+
	Механизм перемещения несуще- тягового каната (приводной механизм)	-	-	+	+	-	-
	Механизм пространственной ориентации канатного шкива	-	-	+	+	-	-
	Механизм натяжения несуще-тягового каната	-	-	+	+	+	-
	Система управления	-	+	-	+	-	+
	Тормозной механизм	-	+	-	-	-	+
	Дополнительные устройства, механизмы и системы	-	+	+	+	+	+
IV	Несущий, тяговый или несуще-тяговый канат	-	-	+	+	+	-
	Устройство для подвешивания транс- портируемого груза	-	-	-	+	-	-
	Контрольно-диагностическая система мониторинга канатной системы	-	-	+	+	+	-
	Система безопасности движения транспортируемого груза	-	-	-	+	-	-

Примечание: «+» - признак работы расчетного элемента; «-» - признак отсутствия работы расчетного элемента.

- выносные опоры, обеспечивающие об-
щую устойчивость мобильного комплекса
против опрокидывания самоходного шасси
под действием опрокидывающего момента
от значительных горизонтальных монтаж-
ных нагрузок;

- концевая опора, изменяющая свою про-
странственную ориентацию от исходного,
близкого к горизонтальному, транспортного

положения до конечного, близкого к верти-
кальному, рабочего положения;

- насосная система, механизм установки и
фиксации концевой опоры в рабочем положе-
нии и система управления, обеспечивающие
подъем концевой опоры путем поворота ее ме-
таллоконструкции относительно цилиндриче-
ского шарнира крепления к несущей раме са-
моходного шасси.

Режим навешивания канатной системы (режим Рн) и режим демонтажа канатной системы (режим Рд) требуют функционирования, главным образом, таких расчетных элементов, как:

- силовая установка, устройство отбора мощности и насосная система, обеспечивающие энергетические потребности дополнительных устройств и систем компонентов II и III;

- несущая рама и концевая опора, воспринимающие нагрузки со стороны монтируемого (демонтируемого) компонента IV;

- выносные опоры, обеспечивающие общую устойчивость мобильного комплекса против опрокидывания самоходного шасси под действием опрокидывающего момента от значительных горизонтальных нагрузок со стороны монтируемого (демонтируемого) компонента IV;

- механизм натяжения несущего-тягового каната, обеспечивающий требуемую длину несущего-тягового каната с учетом его естественного провисания в пролете между концевыми опорами сопрягаемых мобильных комплексов;

- механизм пространственной ориентации канатного шкива, обеспечивающий согласование углов наклона плоскости канатного шкива и ветвей несущего-тягового каната вследствие его естественного провисания под собственным весом и весом транспортируемого груза и разности высотных отметок расположения сопрягаемых мобильных комплексов;

- дополнительные устройства и системы, задействованные при выполнении монтажных и демонтажных технологических операций по навешиванию и снятию несущего-тягового каната (или несущего и тягового канатов) между канатными шкивами сопрягаемых мобильных комплексов;

- несущий-тяговый канат.

В зависимости от используемой технологии навешивания (демонтажа) компонента IV также возможно использование и ряда других расчетных элементов, в частности, механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении, механизма перемещения

несущего-тягового каната, тормозного механизма.

Рабочий режим мобильной канатной дороги (режим Рр) требует функционирования, главным образом, таких расчетных элементов, как:

- силовая установка, устройство отбора мощности и насосная система, обеспечивающие энергетические потребности гидроприводов механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении, механизма перемещения несущего-тягового каната, механизма натяжения несущего-тягового каната (при гидравлическом способе натяжения каната) компонентов II и III;

- выносные опоры, обеспечивающие общую устойчивость мобильного комплекса против опрокидывания самоходного шасси под действием опрокидывающего момента от значительных горизонтальных эксплуатационных нагрузок (силы натяжения несущего каната, веса каната, транспортируемого груза и устройства для его подвески, ветрового давления);

- несущая рама и концевая опора, воспринимающие нагрузки со стороны монтируемого (демонтируемого) компонента IV;

- механизм установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении, механизм перемещения несущего-тягового каната и механизма натяжения несущего-тягового каната, обеспечивающие штатную работу компонента IV.

- несущий-тяговый канат, устройство для подвешивания транспортируемого груза, контрольно-диагностическая система мониторинга канатной системы и система безопасности движения транспортируемого груза.

3. Структура цифрового двойника мобильной канатной дороги

Цифровой двойник мобильной канатной дороги по своей сути представляет собой комплексную информационную математическую модель мобильной канатной дороги, имеющую многоуровневую иерархическую структуру и состоящую из совокупности информационных математических моделей более низкого уровня.

Структурно-функциональная схема цифрового двойника мобильной канатной дороги для штатного режима работы (т.е. аварийный

режим работы мобильной канатной дороги Ра не учитывается) представлена на рис. 5.

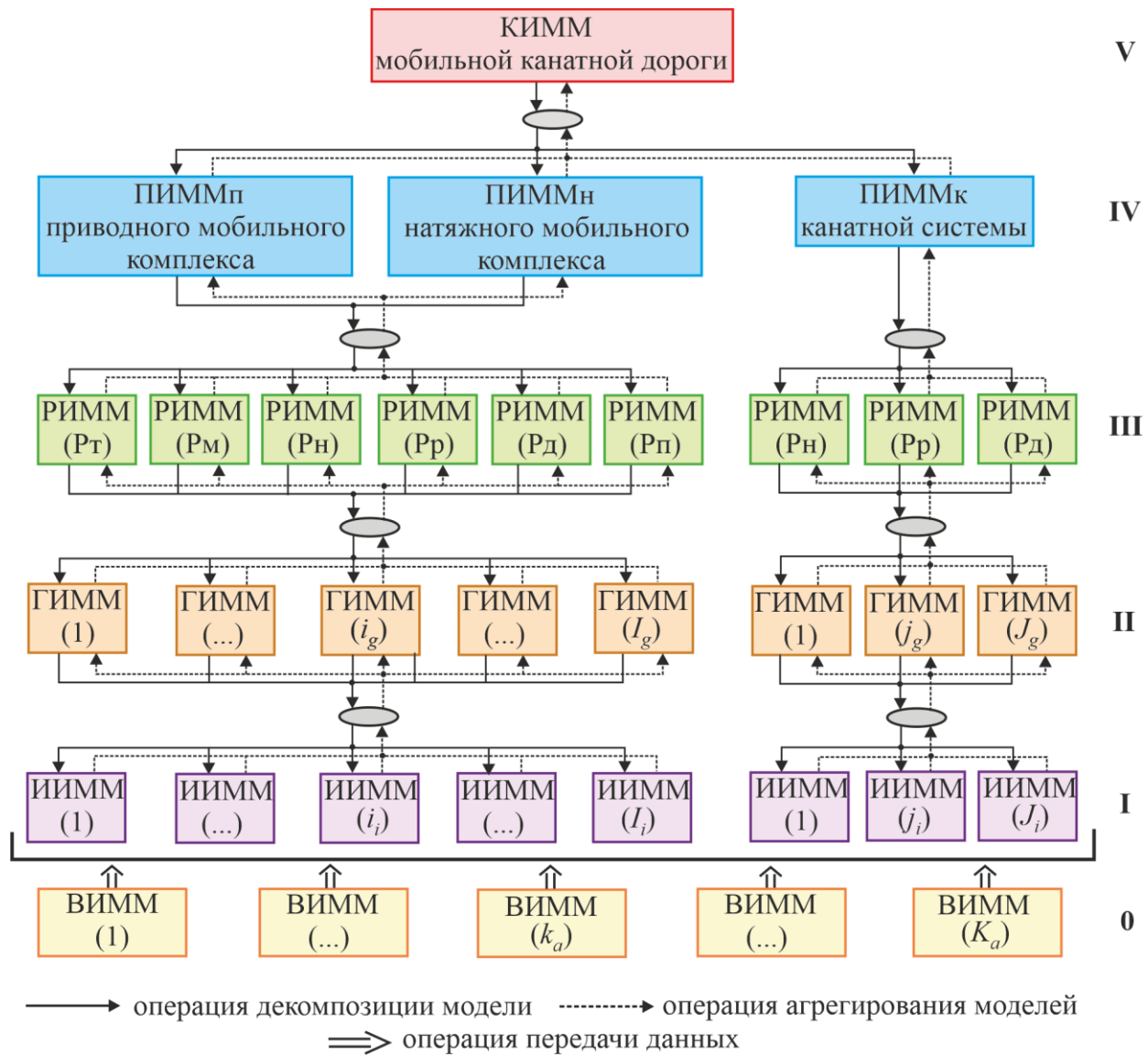


Рис. 5. Структурно-функциональная схема информационных моделей цифрового двойника мобильной канатной дороги для штатного режима работы

Данная схема построения цифрового двойника реализует системный подход, в настоящее время рассматриваемый как наиболее перспективный. При этом каждому расчетному структурному элементу компонентов мобильной канатной дороги, значащему с точки зрения его влияния на протекание физических рабочих процессов и потому учитываемому при математическом моделировании этих процессов, ставится в соответствие индивидуальная информационная ма-

тематическая подмодель, связанная с индивидуальными информационными моделями других расчетных структурных элементов с помощью совместных параметров и уравнений связи. Такой подход позволяет создавать удобные в использовании модульные информационные математические модели различной степени сложности, а также в наиболее корректно учитывать наличие реальных обратных связей между расчетными элементами мобильной канатной дороги.

В зависимости от своего функционального назначения информационные математические модели, входящие в состав цифрового двойника, разделяются на:

- вспомогательные информационные математические модели (ВИММ) уровня 0;
- индивидуальные информационные математические модели устройства или системы (ИИММ уровня I);
- групповые информационные математические модели устройств и (или) систем (ГИММ) уровня II;
- режимные информационные математические модели структурных компонентов (РИММ) уровня III, подразделяемые на:
 - режимные информационные математические модели мобильного комплекса (РИММм),
 - режимные информационные математические модели канатной системы (РИММк);
- полные информационные математические модели структурных компонентов (ПИММ) уровня IV, подразделяемые на:
 - полная информационная математическая модель приводного мобильного комплекса (ПИММп),
 - полная информационная математическая модель натяжного мобильного комплекса (ПИММн),
 - полная информационная математическая модель канатной системы (ПИММк).

Информационные математические модели каждого последующего, более высокого уровня формируются путем выполнения операции агрегирования двух или большего числа информационных математических моделей предыдущего, более низкого уровня. Это позволяет построить информационную математическую модель, учитывающую реально существующие физические взаимосвязи между несколькими расчетными структурными элементами и позволяющую повысить степень адекватности количественных результатов моделирования рабочих процессов.

В свою очередь, информационные математические модели каждого более высокого уровня путем выполнения операции декомпозиции разделяются на две или большее

число информационных математических моделей более низкого уровня, характеризующихся внутренним физическим единством с точки зрения математического моделирования конкретного рабочего процесса в конкретном структурно-функциональном компоненте. Это позволяет упростить построение информационной математической модели низшего уровня или использовать в ее качестве уже известную математическую модель аналогичного назначения.

Нижний уровень комплексной информационной математической модели мобильной канатной дороги (уровень I) формируется совокупностью индивидуальных информационных математических моделей всех расчетных структурных элементов, рассмотренных в разд. 2.2. Общее число таких моделей для приводного или натяжного мобильного комплекса составляет I_i , для канатной системы – J_i .

Каждая индивидуальная модель включает две связанные подмодели. Для расчетного элемента, представляющего собой устройство или механизм, одна из подмоделей представляет собой трехмерную геометрическую компьютерную модель этого элемента и конструкторско-технологической документации, разработанные на этапе проектирования и подготовки производства. Для расчетного элемента, представляющего собой систему (гидравлическую, пневматическую, электрическую, управляющую, диагностическую и др.), одна из подмоделей представляет собой схемную компьютерную модель этого элемента с определением всей номенклатуры используемых элементов (гидро- и пневмоаппаратов, устройств и машин, электрических и электронных устройств, датчиков и средств изменения и т.д.). Вторая подсистема любого расчетного элемента представляет собой расчетную компьютерную модель, которая позволяет на основе имитационного моделирования прогнозировать кинетику количественных параметров рабочих процессов, протекающих в расчетном элементе в различных режимах его работы с учетом известных значений исходных параметров.

Групповые информационные математические модели формируются путем проведе-

ния операции агрегирования индивидуальных информационных математических моделей двух и большего числа устройств и (или) систем уровня I. Общее число таких моделей для приводного или натяжного мобильного комплекса составляет I_g , для канатной системы – J_g .

При построении групповых моделей рассматриваются те расчетные элементы, которые функционируют одновременно в рамках конкретного режима работы мобильной канатной дороги (табл. 1). При этом выделяются те совместные количественные параметры, которые присутствуют в математических зависимостях для моделирования рабочих процессов в нескольких расчетных элементах, и которые формируют взаимные связи расчетных элементов. Эти совместные параметры для любого момента времени моделирования определяются согласно математическим зависимостям каждого расчетного элемента с последующим, при необходимости, итерационным согласованием полученных величин и перерасчетом остальных количественных параметров индивидуальных информационных математических моделей.

Как пример, рассмотрим формирование групповой модели вида

$$\text{ГИММ}(1) =$$

$\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{ко}}) \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{нс}}) \cup \text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{yf}})$ (1) путем агрегирования индивидуальных моделей концевой опоры $\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{ко}})$, насосной системы $\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{нс}})$ и механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении $\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{yf}})$ применительно к режиму установки и фиксации концевой опоры мобильного комплекса в рабочем положении (режим Рм) для конструктивного исполнения комплекса, показанного на рис. 2 и 3.

В качестве индивидуальной информационной математической модели концевой опоры $\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{ко}})$ целесообразно использовать математическую модель определения кинематических и динамических параметров пространственного перемещения концевой опоры с центральным расположением на несущей раме самоходного шасси при ее установке в рабочее положение с помощью силового гидроцилиндра насосной системы мобильного комплекса, ранее разработанную в

[13, 36]. В качестве индивидуальной модели насосной системы $\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{нс}})$ в зависимости от принятой схемы частотно-дроссельного регулирования гидропривода целесообразно использовать одну из математических моделей – модель прогнозирования гидродинамических параметров насосной системы при последовательной относительно силового гидроцилиндра механизма подъема концевой опоры установке регулируемых дросселей [37] или модель прогнозирования гидродинамических параметров насосной системы при параллельной относительно силового гидроцилиндра механизма подъема концевой опоры установке регулируемого дросселя [38, 39]. В качестве индивидуальной модели механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении $\text{ИИММ}(\mathcal{E}_{\text{yf}})$ целесообразно использовать математическую модель силового расчета концевой опоры с центральным расположением на несущей раме самоходного шасси при ее установке в рабочее положение с помощью одиночного силового гидроцилиндра насосной системы мобильного комплекса, ранее разработанную в [7, 36]. Анализ указанных индивидуальных моделей позволяет сделать вывод об их взаимосвязанности и, следовательно, о правомерности объединения указанных индивидуальных моделей в единую групповую модель. В качестве объединительного начала выступает дифференциальное уравнение движения выходного звена силового гидроцилиндра вида [40]

$$\left(\frac{M_{red}}{A_{inp}} \right) \dot{Q}_{HD,inp} = (A_{inp}P_{inp} - A_{out}P_{out}) \mp F_{ol} - F_{br}, \quad (2)$$

где $Q_{HD,inp}$ – объемный расход рабочей жидкости, поданный в рабочую полость гидроцилиндра; A_{inp} , A_{out} – площадь поршня гидроцилиндра со стороны рабочей полости и со стороны холостой полости; P_{inp} , P_{out} – давление рабочей жидкости в рабочей полости и в холостой полости гидроцилиндра; M_{red} – приведенная к штоку гидроцилиндра полная масса концевой опоры; F_{ol} – эксплуатационные сила (включая инерционные нагрузки),

приведенная к штоку гидроцилиндра; F_{br} - сила торможения, создаваемая дополнительными внешними тормозными устройствами (при их наличии в конструкции механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении).

Уравнение (2) связывает количественные параметры всех объединяемых индивидуальных моделей: параметры A_{inp} и A_{out} управляют геометрической подмоделью насосной системы; параметры p_{inp} , p_{out} и $Q_{HD,inp}$ - расчетной компьютерной подмоделью насосной системы; параметр M_{red} - геометрической подмоделью концевой опоры; параметры F_{ol} и F_{br} - совместно индивидуальными моделями концевой опоры и механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении. За исключением постоянных параметров геометрических подмоделей (A_{inp} , A_{out} , M_{red}) остальные параметры оказывают друг на друга переменное по величине взаимное влияние, обусловленное инерционными эффектами. Поэтому достоверный расчет параметров p_{inp} , p_{out} , $Q_{HD,inp}$, F_{ol} и F_{br} может быть выполнен только в рамках групповой информационной математической модели (1).

Режимные информационные математические модели уровня III формируются путем проведения операции агрегирования двух и более групповых информационных математических моделей уровня II и индивидуальных информационных математических моделей уровня I в рамках общего режима эксплуатации мобильной канатной дороги. Общее число таких моделей для приводного или натяжного мобильного комплекса составляет 6, для канатной системы - 3.

Как пример, рассмотрим формирование режимной модели для компонентов II и III применительно к рабочему режиму мобильной канатной дороги (режим Pp) для конструктивного исполнения мобильного комплекса, показанного на рис. 2 и 3. Агрегирование групповых и индивидуальных моделей позволяет построить режимную информационную модель следующего вида:

$$\begin{aligned} \text{РИММ(Pp)} = & \text{ГИММ(1)} \cup \text{ГИММ(2)} \cup \\ & \cup \text{ГИММ(3)} \cup \text{ГИММ(4)} \cup \text{ИИММ(Э}_{\text{зо}}) \cup \\ & \cup \text{ИИММ(Э}_{\text{по}}) \cup \text{ИИММ(Э}_{\text{нк}}), \quad (3) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \text{ГИММ(1)} = & \text{ИИММ(Э}_{\text{пр}}) \cup \text{ИИММ(Э}_{\text{во}}) \\ & \cup \text{ИИММ(Э}_{\text{ко}}) \cup \text{ИИММ(Э}_{\text{нк}}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ГИММ(2)} = & \text{ИИММ(Э}_{\text{сy}}) \cup \text{ИИММ(Э}_{\text{ом}}) \cup \\ & \cup \text{ИИММ(Э}_{\text{нс}}); \end{aligned}$$

$$\text{ГИММ(3)} = \text{ИИММ(Э}_{\text{нс}}) \cup \text{ИИММ(Э}_{\text{пк}});$$

$$\text{ГИММ(4)} = \text{ИИММ(Э}_{\text{кб}}) \cup \text{ИИММ(Э}_{\text{ск}}).$$

Полные информационные математические модели мобильных комплексов и канатной системы уровня IV формируются путем объединения соответствующих режимных моделей. При этом режимные модели в рамках единой полной модели оказываются автономными, т.е. не связанными между собой взаимосвязанными количественными параметрами, так как в произвольный момент времени эксплуатации мобильной канатной дороги реализуется лишь один конкретный режим ее работы. Таким образом, полные модели мобильных комплексов и канатной системы могут быть представлены в следующем виде:

$$\begin{aligned} \text{ПИММп} = & \text{РИММ(Pт)} + \text{РИММ(Pм)} + \\ & + \text{РИММ(Pн)} + \text{РИММ(Pp)} + \text{РИММ(Pд)} + \\ & + \text{РИММ(Pп)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ПИММн} = & \text{РИММ(Pт)} + \text{РИММ(Pм)} + \\ & + \text{РИММ(Pн)} + \text{РИММ(Pp)} + \text{РИММ(Pд)} + \\ & + \text{РИММ(Pп)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ПИММК} = & \text{РИММ(Pн)} + \text{РИММ(Pp)} + \\ & + \text{РИММ(Pд)}, \end{aligned}$$

причем модели ПИММп и ПИММн отличаются только режимными моделями РИММ(Pp).

Формирование комплексной информационной математической модели мобильной канатной дороги уровня V вновь требует проведения операции агрегирования полных информационных математических моделей мобильных комплексов и канатной системы в рамках трех режимов работы:

- режима навешивания канатной системы (режим Pн);
- рабочего режима мобильной канатной дороги (режим Pp);
- режима демонтажа канатной системы (режим Pд).

Таким образом, комплексная модель мобильной канатной дороги может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \text{КИММ} = & [\text{ПИММ}_\text{п}(\text{Рр}) \cup \text{ПИММ}_\text{н}(\text{Рр}) \cup \\ & \cup \text{ПИММ}_\text{к}(\text{Рр})] + [\text{ПИММ}_\text{п}(\text{Рн}) \cup \\ & \cup \text{ПИММ}_\text{н}(\text{Рн}) \cup \text{ПИММ}_\text{к}(\text{Рн})] + \\ & + [\text{ПИММ}_\text{п}(\text{Рд}) \cup \text{ПИММ}_\text{н}(\text{Рд}) \cup \\ & \cup \text{ПИММ}_\text{к}(\text{Рд})] + \text{ПИММ}_\text{п}(\text{Рт}) + \\ & \text{ПИММ}_\text{н}(\text{Рт}) + \text{ПИММ}_\text{п}(\text{Рм}) + \\ & + \text{ПИММ}_\text{н}(\text{Рм}) + \text{ПИММ}_\text{п}(\text{Рп}) + \\ & \text{ПИММ}_\text{н}(\text{Рп}). \end{aligned} \quad (4)$$

Для проведения моделирования работы мобильной канатной дороги с помощью ее цифрового двойника требуется дополнительная разработка вспомогательных информационных математических моделей уровня 0. Эти модели предназначены для определения необходимых исходных данных при использовании индивидуальных информационных математических моделей расчетных элементов структурно-функциональных компонентов мобильной канатной дороги. Например, вспомогательная модель транспортируемого груза ВИММ(Э_{тр}) представляет собой геометрическую компьютерную модель, дающую трехмерное представление о конфигурации груза, его габаритных размерах, физико-механических характеристиках. Она позволяет оценивать такие количественные параметры, необходимые для использования цифрового двойника, как весовая и ветровая нагрузки на несущий канат, инерционные характеристики и др. Вспомогательная модель опорной поверхности ВИММ(Э_{оп}) содержит информацию о физико-химических и механических характеристиках грунта площадки для размещения мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса и позволяет оценивать такие необходимые для индивидуальных моделей расчетных структурных элементов количественные параметры, как проседание самоходных шасси, несущая способность анкерных устройств выносных опор и др.

4. Заключение

Представленный выше концептуальный подход, основанный на системном представлении и анализе конструктивного исполне-

ния и режимов эксплуатации мобильных канатных дорог на базе концевых мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, является эффективным средством при разработке цифровых двойников мобильных канатных дорог. Разработанная многоуровневая иерархическая структура включает информационные математические модели различного функционального назначения и различной степени взаимной связности, распределенные по уровням структуры в зависимости от степени сложности и возможности дальнейшего их агрегирования в информационные математические модели более высокого уровня. Индивидуальные информационные математические модели, являясь базовыми информационными математическими моделями низшего уровня и позволяющие моделировать рабочие процессы в отдельных расчетных структурных элементах, путем их агрегирования на основе учета уравнений связи и совпадающих количественных параметров прогнозируемых процессов формируют групповые информационные математические модели, а затем – режимные и полные информационные математические модели структурно-функциональных компонентов мобильной канатной дороги.

Данный системный подход и разработанная на его основе многоуровневая иерархическая структура цифрового двойника позволяют при разработке цифровых двойников мобильных канатных дорог получить практически полезные результаты, включая:

- модульность создания цифрового двойника на основе разработки новых или использования уже известных методов моделирования технических устройств и систем с их оформлением в виде индивидуальных информационных математических моделей;
- сравнительную простоту модификации цифрового двойника применительно к мобильным канатным дорогам иного конструктивного исполнения;
- возможность использования ранее разработанных информационных математических моделей для аналогичных расчетных структурных элементов.

Список литературы

1. Hoffmann K. Recent developments in cable-drawn urban transport systems // *FME Transactions*. 2006. Vol. 34. P. 205-212.
2. Nikšić M., Gašparović S. Geographic and traffic aspects of possibilities for implementing ropeway systems in passenger transport // *Promet-Traffic Transp.* 2010. Vol. 22. No. 5. P. 389–398 DOI: 10.7307/ptt.v22i5.204
3. Vuchic V.R. *Urban Transit Systems and Technology*. NY: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 614 p.
4. Alshalalfah B., Shalaby A., Dale S., Othman F. Aerial Ropeway Transportation Systems in the Urban Environment: State of the Art // *J. of Transportation Engineering*. 2012. Vol. 138. No. 3. P. 253-262. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000330
5. Короткий А.А., Лагереv А.В., Месхи В.С., Лагереv И.А., Панфилов А.В. Развитие транспортной инфраструктуры крупных городов и территорий на основе технологии канатного метро. Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2017. 344 с. DOI: 10.5281/zenodo.1311913.
6. Visser R., Obi O.F. Automation and Robotics in Forest Harvesting Operations: Identifying Near-Term Opportunities // *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2017. Vol. 42. No. 1. P. 13-24. DOI: 10.5552/crojfe.2021.739
7. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Таричко В.И. Конструкции и основы проектирования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2020. 207 с.
8. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Prospects for the use of mobile ropeways in the elimination of the consequences of natural and man-made disasters // *Proceedings of the 8th Congress on Scientific Researches and Recent Trends*. Zambales, Philippines, August 2-4, 2021. P. 58.
9. Schluse M., Priggemeyer M., Atorf L., Rossmann Ju. Experimentable Digital Twins - Streamlining Simulation-Based Systems Engineering for Industry 4.0 // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2018. Vol. 14. No. 4. P. 1722-1731. DOI: 10.1109/TII.2018.2804917
10. Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. М.: ООО «АльянсПринт», 2020. 401 с.

References

1. Hoffmann K. Recent developments in cable-drawn urban transport systems. *FME Transactions*, 2006, Vol. 34, pp. 205-212.
2. Nikšić M., Gašparović S. Geographic and traffic aspects of possibilities for implementing ropeway systems in passenger transport. *Promet-Traffic Transp.* 2010, Vol. 22, No. 5, pp. 389–398. DOI: 10.7307/ptt.v22i5.204
3. Vuchic V.R. *Urban Transit Systems and Technology*. NY: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 614 p.
4. Alshalalfah B., Shalaby A., Dale S., Othman F. Aerial Ropeway Transportation Systems in the Urban Environment: State of the Art. *J. of Transportation Engineering*, 2012, Vol. 138, No. 3, pp. 253-262. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000330
5. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V. *Razvitie transportnoy infrastruktury krupnykh gorodov i territoriy na osnove tekhnologii kanatnogo metro* [The development of transport infrastructure of large cities and territories on the basis of technology of passenger ropeways]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2017. 344 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913> (In Russian)
6. Visser R., Obi O.F. Automation and Robotics in Forest Harvesting Operations: Identifying Near-Term Opportunities. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2017, Vol. 42, No. 1, pp. 13-24. DOI: 10.5552/crojfe.2021.739
7. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Konstruktsii i osnovy proektirovaniya mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Structures and design fundamentals of mobile transporting and overloading rope facilities]. Bryansk, RISO BGU, 2020. 207 p. (In Russian)
8. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Prospects for the use of mobile ropeways in the elimination of the consequences of natural and man-made disasters. In: *Proceedings of the 8th Congress on Scientific Researches and Recent Trends*. Zambales, Philippines, August 2-4, 2021. P. 58.
9. Schluse M., Priggemeyer M., Atorf L., Rossmann Ju. Experimentable Digital Twins - Streamlining Simulation-Based Systems Engi-

11. Лагерев 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

12. Лагерев И.А., Лагерев А.В., Таричко В.И. Варианты компоновки основного технологического оборудования на базовых шасси мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов и их сравнительный анализ // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2021. №3. С. 236-250. DOI:10.22281/2413-9920-2021-07-03-236-250

13. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Компоновка 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.

14. Пат. 200827 Российская Федерация, МПК В61В 7/06. Самоходная концевая станция / Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И.; заявитель и патентообладатель ФБГОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского». - № 2020117118; заявл. 12.05.2020; опубл. 12.11.2020, Бюл. № 32.

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

16. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Влияние параметров рельефа на выбор оптимального шага промежуточных опор вдоль линии канатного метро // *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2017. № 3. С. 253-272. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-03-253-272

17. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Моделирование рабочих процессов мобильных транспортно-перегрузочных ка-

neering for Industry 4.0. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, Vol. 14, No. 4, pp. 1722-1731. DOI:10.1109/TII.2018.2804917

10. Prokhorov A., Lysachev M. *Tsifrovoy dvoynik. Analiz, trendy, mirovoy opyt* [Digital twin. Analysis, trends, world experience]. Moscow, ООО «AlyansPrint», 2020. 401 p. (In Russian)

11. 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)

12. Lagerev I.A., Lagerev A.V., Tarichko V.I. Variants of the layout of the main technological equipment on the base chassis of mobile transport and reloading rope complexes and their comparative analysis. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.3, pp. 236-250. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-03-236-250 (In Russian)

13. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Placement of technological equipment on the basic chassis of the mobile transportation and reloading rope complex. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.3, pp. 388-403. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-388-403 (In Russian)

14. 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)

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

натных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2021. 204 с.

18. Аксенов П.В. Многоосные автомобили. М.: Машиностроение, 1989. 280 с.

19. Антонов А.С., Голяк В.К. Армейские автомобили: конструкция и расчет. Часть первая: типы автомобилей, компоновка, силовые передачи. М.: Военное издательство Министерства обороны СССР, 1970. 542 с.

20. Белоусов Б.Н., Попов С.Д. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 728 с.

21. Бочаров Н.Ф., Цитович И.С., Полунгян А.А., Семенов В.М., Цыбин В.С., Жеглов Л.Ф. Конструирование и расчет колесных машин высокой проходимости. М.: Машиностроение, 1983. 299 с.

22. Веселов Н.Б. Вездеходные транспортно-технологические машины. Конструкции. Конструирование и расчет. Нижний Новгород: РИ «Бегемот», 2010. 320 с.

23. Гладов Г.И., Вихров А.В., Зайцев С.В., Кувшинов В.В., Павлов В.В. Конструкции многоцелевых гусеничных и колесных машин. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 400 с.

24. Гладов Г.И., Вихров А.В., Кувшинов В.В., Павлов В.В. Многоцелевые гусеничные и колесные машины: Конструкция. М.: Транспорт, 2001. 272 с.

25. Пойченко В.В., Кондрашов П.В., Потемкин С.В., Пойченко О.В., Хабарова Т.С. Современные грузовые автотранспортные средства: Справочник. М.: Агентство «Доринформсервис», 2004. 592 с.

26. Проектирование полноприводных колесных машин: в 3-х т. Т.1 / под ред. А.А. Полунгяна. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 496 с.

27. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Предварительная компоновка основного технологического оборудования самоходной машины мобильной канатной дороги со штанговым механизмом установки и фиксации концевой опоры // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №4. С. 336-347. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-04-336-347

28. Лагереv И.А., Таричко В.И., Лагереv

(Russian)

16. Lagerev A.V., Lagerev I.A. The effect of topography on the choice of optimal step intermediate supports along the line of the cable metro. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.3, pp. 253-272. DOI: 10.22281/2413-9920-2017-03-03-253-272 (In Russian)

17. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Modelirovanie rabochikh 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)

18. Aksekov P.V. *Mnogoosnye avtomobili* [Multi-axle cars]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 280 p. (In Russian)

19. Antonov A.S., Golyak V.K. *Armeyskie avtomobili: konstruktsiya i raschet. Ch. I: tipy avtomobiley, komponovka, silovye peredachi* [Army vehicles: design and calculation. Part I: types of cars, layout, power transmission]. Moscow, Voennoe izdatelstvo Ministerstva obrony SSSR, 1970. 542 p. (In Russian)

20. Belousov B.N., Popov S.D. *Kolesnye transportnye sredstva osobo bolshoy gruzopodemnosti* [Wheeled vehicles of extra heavy duty]. Moscow, Izdatelstvo MGTU imeni N.E. Bauman, 2006. 728 p. (In Russian)

21. Bocharov N.F., Tsitovich I.S., Polungyan A.A., Semenov V.M., Tsybin V.S., Zheglov L.F. *Konstruirovaniye i raschet kolesnykh mashin vysokoy prokhodimosti* [Design and calculation of high-traffic wheeled vehicles]. Moscow, Mashinostroenie, 1983. 299 p. (In Russian)

22. Veselov N.B. *Vezdekhodnye transportno-tekhnologicheskie mashiny. Konstruktsii. Konstruirovaniye i raschet* [All-terrain transport and technological vehicles. Constructions. Design and calculation]. Nizhniy Novgorod, RI Begemot, 2010. 320 p. (In Russian)

23. Gladov G.I., Vikhrov A.V., Zaytsev S.V., Kuvshinov V.V., Pavlov V.V. *Konstruktsii mnogotselovykh gusenichnykh i kolesnykh mashin* [Designs of multipurpose

А.В. Обеспечение вертикального габарита самоходной машины со штанговым механизмом установки и фиксации концевой опоры для мобильной канатной дороги // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. – 2021. - №2. – С. 141-152. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-02-141-152

29. Дукельский А.И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны. М.-Л.: Машиностроение, 1966. 484 с.

30. Канатная дорога [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Канатная_дорога (Дата обращения: 20.11.2020).

31. Справочник проектировщика промышленных, жилых и гражданских зданий и сооружений. Промышленный транспорт. М.: Стройиздат, 1984. 231 с.

32. Логвинов А.С., Короткий А.А. Пассажирские одноканатные дороги. Устройство и эксплуатация. Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2016. 210 с.

33. Таричко В.И., Лагереv И.А., Черных А.А. Компьютерное моделирование режимов движения мобильной транспортно-технологической машины // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №1. С. 136-143. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-136-143.

34. 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.

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

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

37. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv

tracked and wheeled vehicles]. Moscow, Izdatelskiy tsentr «Akademiya», 2010. 400 p. (In Russian)

24. Gladov G.I., Vikhrov A.V., Kuvshinov V.V., Pavlov V.V. *Mnogotsel'nyye gusenichnyye i kolesnyye mashiny: Konstruktsiya* [Multi-purpose tracked and wheeled vehicles: Construction]. Moscow, Transport, 2001. 272 p. (In Russian)

25. Poychenko V.V., Kondrashov P.V., Potemkin S.V., Poychenko O.V., Khabarova T.S. *So-vremennyye gruzovyye avtotransportnyye sredstva: Spravochnik* [Modern cargo vehicles: Guide]. Moscow, Agentstvo «Dorinform-servis», 2004. 592 p. (In Russian)

26. *Proektirovaniye polnoprivodnykh kolyosnykh mashin: v 3 t. T.1* [Design of four-wheel drive wheeled vehicles: in 3 vols. Vol.1]. Ed. A.A. Polungyan. Moscow, Izdatelstvo MGTU imeni N.E. Bauman, 2008. 496 p. (In Russian)

27. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Preliminary layout of the main technological equipment of a self-propelled machine with a rod mechanism for installing and fixing the end tower for a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.4, pp. 336-347. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-04-336-347 (In Russian)

28. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Providing the vertical dimension of a self-propelled machine with a rod mechanism for installing and fixing the end tower for a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.2, pp. 141-152. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-07-02-141-152 (In Russian)

29. Dukelskiy A.I. *Podvesnyye kanatnyye dorogi i kabelnyye krany* [Overhead cableways and cable cranes]. Moscow-Leningrad, Mashinostroeniye, 1966. 484 p. (In Russian)

30. *Kanatnaya doroga* [site]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Канатная_дорога (Дата обращения: 20.02.2021) (accessed 03 Jan. 2022). (In Russian)

31. *Spravochnik proektirovshchika. Promyshlennyy transport* [Designer reference. Industrial transport]. Eds. A.S. Gelman, S.D. Chubarov. Moscow, Stroyizdat, 1984. 231 p.

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.

38. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv 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: 10.22281/2413-9920-2020-06-04-73-92.

39. 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.

40. Лагереv А.В., Лагереv 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: 10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379.

(In Russian)

32. Logvinov A.S., Korotkiy A.A. *Passazhirskie odnokanatnye dorogi. Ustroystvo i ekspluatatsiya* [Passenger ropeways with single rope. Device and operation]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2016. 210 p. (In Russian)

33. 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)

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

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

36. 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. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_46

37. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Modeling operation modes of hydraulic drives with frequency-throttle regulation of mobile transport and overloading ropes complexes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 462-480. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480 (In Russian)

38. 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)

39. 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: Confer-*

† *ence Series*, 2021, Vol.1753, 012022. DOI:
† 10.1088/1742-6596/1753/1/012022.

† 40. 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-tekhnicheskiy*
† *vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo*
† *universiteta*, 2018, No.4, pp. 355-379. DOI:
† [https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-](https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379)
† 04-355-379 (In Russian)

УДК (UDC) 62-592.132/62-585.13/331.436/621.867.61

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ PM10 ПРИ РАБОТЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ ФРИКЦИОННЫХ РОЛИКОВ

METHOD OF ESTIMATION OF PM10 FINE PARTICLE CONCENTRATION DURING OPERATION OF CENTRIFUGAL FRICTION ROLLERS

Сафронов Е.В., Носко А.Л., Шарифуллин И.А., Гуськова А.С.
Safronov E.V., Nosko A.L., Sharifullin I.A., Guskova A.S.Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана (Москва, Россия)
Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russian Federation)

Аннотация. Одним из решений, позволяющим повысить объем хранения и скорость обработки паллетированных грузов на складах, является использование гравитационных стеллажей для паллет. В качестве элементов безопасной эксплуатации таких конвейеров широко применяются центробежные фрикционные ролики, обеспечивающие скорость движения паллеты в пределах, не превышающих допустимых значений. При работе центробежных фрикционных роликов возможно попадание в атмосферу продуктов износа – тормозной пыли, которая оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека. Поэтому актуальной задачей является исследование работы тормозных роликов фрикционного типа с точки зрения экологической оценки выделяемой тормозной пыли. В работе проведена оценка концентрации мелкодисперсных частиц размером от 10 мкм до 2,5 мкм при работе центробежных фрикционных роликов в гравитационных стеллажах для паллет, предложена методика оценки их концентрации в рабочей зоне склада. Введен коэффициент экологичности конструкции тормозного ролика фрикционного типа, который является одним из факторов, определяющих максимальное количество торможений, и принимает значения от 0 до 1,0 для различных конструктивных исполнений фрикционного ролика - закрытого типа, вентилируемого и открытого типа. Результаты экспериментального исследования материалов фрикционных пар тормозных роликов показывают, что максимальное количество торможений обеспечивается при давлении на фрикционную накладку 0,1 МПа, что соответствует массе паллеты 1000 кг. Рассмотрен пример использования методики оценки концентрации частиц в рабочей зоне для склада, состоящего из одного блока гравитационных стеллажей для паллет 1200x800x1500 мм (длина x ширина x высота), массой 1000 кг, общим количеством паллетомест 546. Анализ полученных результатов показал, что максимальное количество торможений паллет при котором будет достигнута предельно допустимая концентрация частиц размером от 10 мкм до 2,5 мкм и максимальная оборачиваемость склада могут служить комплексной оценкой его экологичности.

Abstract. One of the solutions to increase the storage capacity and speed of handling palletized goods in warehouses is the use of gravity pallet racking. As elements of the safe operation of such conveyors, centrifugal friction rollers are widely used, which ensure the speed of the pallet within the limits that do not exceed the permissible values. During the operation of centrifugal friction rollers, wear products - brake dust, which have an adverse effect on the human body, may enter the atmosphere. Therefore, an urgent task is to study the operation of friction-type brake rollers from the point of view of the environmental assessment of the released brake dust. The paper assesses the concentration of fine particles with dimensions from 10 micrometers to 2.5 micrometers during the operation of centrifugal friction rollers in gravity pallet racks, and proposes a method for estimating their concentration in the warehouse working area. The coefficient of environmental friendliness of the design of the brake roller of the friction type has been introduced, which is one of the factors determining the maximum number of braking, and takes values from 0 to 1.0 for various designs of the friction roller - closed type, ventilated and open type. The results of an experimental study of materials for friction pairs of brake rollers show that the maximum amount of braking is provided at a pressure on the friction lining of 0.1 MPa, which corresponds to a pallet weight of 1000 kg. An example of using the methodology for estimating the concentration of particles in the working area for a warehouse consisting of one block of gravity racks for pallets 1200x800x1500 mm (length x width x height), weighing 1000 kg, with a total number of 546 pallet places is considered. Analysis of the results showed that the maximum number of pallet braking at which the maximum permissible concentration of particles with a dimension of 10 micrometers to 2.5 micrometers is reached and the maximum turnover of the warehouse can serve as a comprehensive assessment of its environmental friendliness.

Ключевые слова: оценка, предельно допустимая концентрация, центробежный фрикционный ролик, коэффициент экологичности, количество торможений, оборачиваемость склада.

Дата принятия к публикации: 27.01.2022
Дата публикации: 25.03.2022

Сведения об авторах:

Сафронов Евгений Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), e-mail: gen-s@mail.ru

ORCID: 0000-0002-4250-7147

Носко Андрей Леонидович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), e-mail: dr.nosko@mail.ru

ORCID: 0000-0003-1382-4095

Шарифуллин Ильдар Азатович – аспирант кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), e-mail: sharifullin@bmstu.ru

ORCID: 0000-0002-1930-2602

Гуськова Анна Сергеевна – студент кафедры «Подъемно-транспортные системы», ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), e-mail: guskovaa17@mail.ru

Keywords: estimation, maximum permissible concentration, centrifugal friction roller, coefficient of environmental friendliness, number of brakes, warehouse turnover.

Date of acceptance for publication: 27.01.2022
Date of publication: 25.03.2022

Authors' information:

Evgeniy V. Safronov – Candidate Technical Sciences, Associate Professor of the Department “Lifting and Transport Systems” at Bauman Moscow State Technical University, e-mail: gen-s@mail.ru
 ORCID: 0000-0002-4250-7147

Andrey L. Nosko – Doctor Technical Sciences, Professor of the Department “Lifting and Transport Systems” at Bauman Moscow State Technical University
 e-mail: dr.nosko@mail.ru
 ORCID: 0000-0003-1382-4095

Idar A. Sharifullin – postgraduate, Department “Lifting and Transport Systems” at Bauman Moscow State Technical University
 e-mail: sharifullin@bmstu.ru
 ORCID: 0000-0002-1930-2602

Anna S. Guskova – student, Department “Lifting and Transport Systems” at Bauman Moscow State Technical University
 e-mail: guskovaa17@mail.ru

1. Введение

Одним из решений, позволяющим повысить объем хранения и скорость обработки паллетированных грузов на складах, является использование гравитационных стеллажей для паллет, состоящих из стеллажной конструкции и установленных в ней гравитационных роликовых конвейеров (рис. 1).

В настоящее время в качестве элементов безопасной эксплуатации таких конвейеров широко применяются центробежные фрикционные ролики, устанавливаемые по длине гравитационных роликовых конвейеров и обеспечивающих скорость движения паллеты в пределах, не превышающих допустимых значений, определяемых конструкцией

упора устройства остановки и разделения паллет [1].

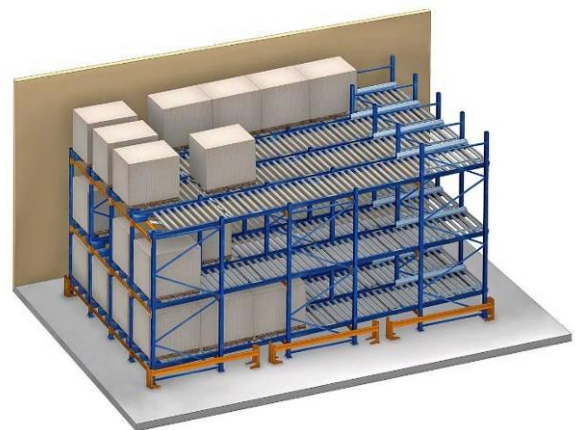


Рис. 1. Гравитационный стеллаж для паллет

Процесс работы центробежного фрикционного ролика сопровождается трением фрикционной накладки 3 и обечайки 4 при разгоне центробежного тормоза 2 с помощью планетарного мультипликатора 1 (рис. 2)

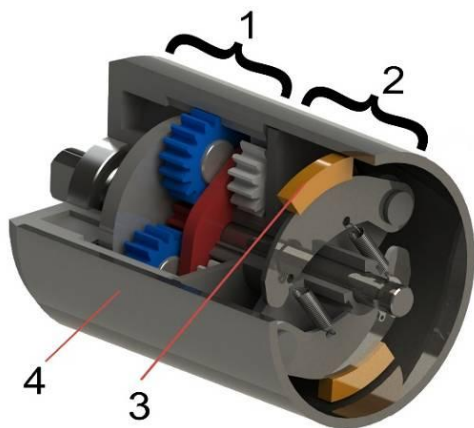


Рис. 2. Общий вид центробежного фрикционного ролика (вторая опора условно не показана)

В зависимости от конструкции центробежного фрикционного ролика возможно попадание в атмосферу продуктов износа – тормозной пыли, которая оказывает неблагоприятное воздействие на организм человека [2].

Одним из основных показателей пыли является дисперсность (размер частиц), по которой условно принята следующая классификация: мелкая пыль, характеризующаяся размером частиц до 100 мкм; средняя – до 200 мкм; крупная – более 200 мкм. Особое внимание следует уделять содержанию в воздухе мелкодисперсных твердых частиц пыли размером менее 10 мкм которая может попадать напрямую в кровеносную систему, закупоривать сосуды и в результате являться причиной сердечно-сосудистых заболеваний, а также проникать в глубокие дыхательные пути, что приводит к заболеваниям легких, в том числе онкологии.

Различают следующие размерные фракции мелкодисперсных твердых частиц [3]: PM10 – используется для частиц с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм; PM2,5 – аэродинамический диаметр частиц менее 2,5

мкм; PM1 – аэродинамический диаметр частиц менее 1,0 мкм; грубая фракция – размер частиц между 2,5 и 10 мкм; нано частицы – аэродинамический диаметр менее 0,1 мкм.

PM расшифровывается как Particular Matter (частица вещества), а номер обозначает размер такой частицы [4, 5]. Так, для класса PM10 характерны частицы размером от 10 микрометров до 2,5 микрометра, а для класса PM2,5 частицы имеют размер от 2,5 мкм до 1 мкм. Для сравнения, средний размер частички очень мелкого песка всего 90 мкм, а средняя толщина волоса человека порядка 70 мкм.

Массовая концентрация PM2,5 и PM10 является ключевым параметром для оценки качества воздуха, влияющим на здоровье человека. Ситуация с вредом от мелкодисперсных частиц настолько серьезная, что Всемирная Организация Здравоохранения и Международное агентство по изучению рака отнесли эти частицы к первой категории опасности [5]. Многие страны ввели свои национальные нормативы ограничения по уровню загрязнения мелкодисперсными частицами воздуха (табл. 1), в которых делается разделение на среднесуточный и среднегодовой уровни загрязнения, а в некоторых случаях применяется показатель как розовая концентрация. Данные по Российской Федерации взяты из [6].

Как видно из таблицы, нормы в Российской Федерации практически полностью соответствуют «среднемировым» показателям.

Массовые концентрации частиц PM10, PM2,5 и PM1 могут быть рассчитаны на основе данных об их количественном распределении по размеру и плотности [7].

В связи с этим актуальной задачей является исследование работы тормозных роликов фрикционного типа с точки зрения экологической оценки выделяемой тормозной пыли.

Цель работы - оценка концентрации мелкодисперсных частиц PM10 при работе центробежного фрикционного ролика.

Таблица 1.

Предельно-допустимые концентрации по PM_{2,5} и PM₁₀ в разных странах (на февраль 2019 г.)

Страна / Организация	PM 10, мкг/м ³			PM 2,5, мкг/м ³		
	Разовая	Среднесуточная	Среднегодовая	Разовая	Среднесуточная	Среднегодовая
ВОЗ		50	20		25	10
РФ	300	60	40	160	35	25
Европейский союз		50	40		25	
США		150			35	12
Китай		150	70		35	70

2. Методика оценки концентрации частиц PM₁₀ в рабочей зоне гравитационного стеллажного блока для паллет

Рабочая зона гравитационного стеллажного блока для паллет показана на рис. 3.

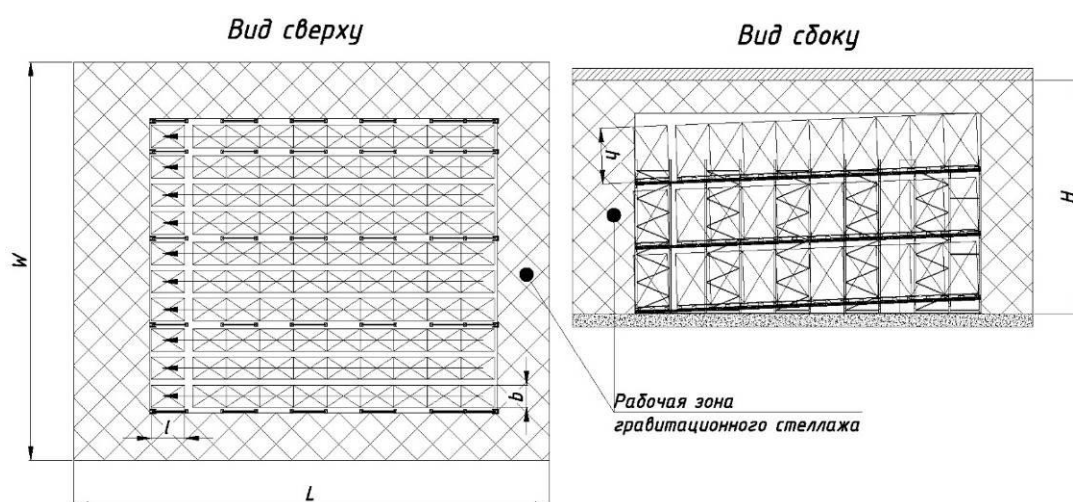


Рис. 3. Гравитационный стеллаж для паллет.

Концентрация C_{PM10}^1 частиц PM₁₀, выделяемых в рабочей зоне гравитационного стеллажного блока (далее по тексту – блока) за секунду торможения тормозными роликами фрикционного типа может быть определена как:

$$C_{PM10}^1 = \frac{C_V^{60} \rho_0}{60}, \quad (1)$$

где C_V^{60} – объемная концентрация частиц PM₁₀ в рабочей зоне блока за минуту, мкм³/(м³·мин); ρ_0 – плотность частиц PM₁₀, мкг/мкм³.

На основании результатов исследований, приведенных в [8] плотность ρ_0 частиц PM₁₀ можно считать равной $\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$.

Объемная концентрация C_V^{60} частиц PM₁₀, выделяемых в рабочей зоне блока за

минуту торможения, может быть определена из экспериментальных данных по износу пар трения тормозных роликов фрикционного типа:

$$C_V^{60} = C_V \cdot \frac{V_W}{Q} \cdot K_{ECO}, \quad (2)$$

где C_V – объемная концентрация частиц PM₁₀ в расходе воздуха анализатора частиц (спектрометра), мкм³/м³; V_W – объем рабочей зоны блока, м³; Q – расход воздуха анализатора частиц (спектрометра), м³/мин; K_{ECO} – коэффициент экологичности конструкции тормозного ролика фрикционного типа.

Объем рабочей зоны V_W блока может быть определен как (рис. 1):

$$V_W = L \cdot W \cdot H - N_p \cdot l \cdot b \cdot h, \quad (3)$$

где L, W, H – соответственно длина, ширина и высота рабочей зоны, м; N_p – количество паллетомест в блоке; l, b, h – длина, ширина и высота паллеты соответственно, м.

Коэффициент экологичности конструкции K_{ECO} тормозного ролика фрикционного типа принимает значения $1 \geq K_{ECO} \geq 0$ и определяет долю частиц, которая попадает при торможении паллеты в рабочую зону блока.

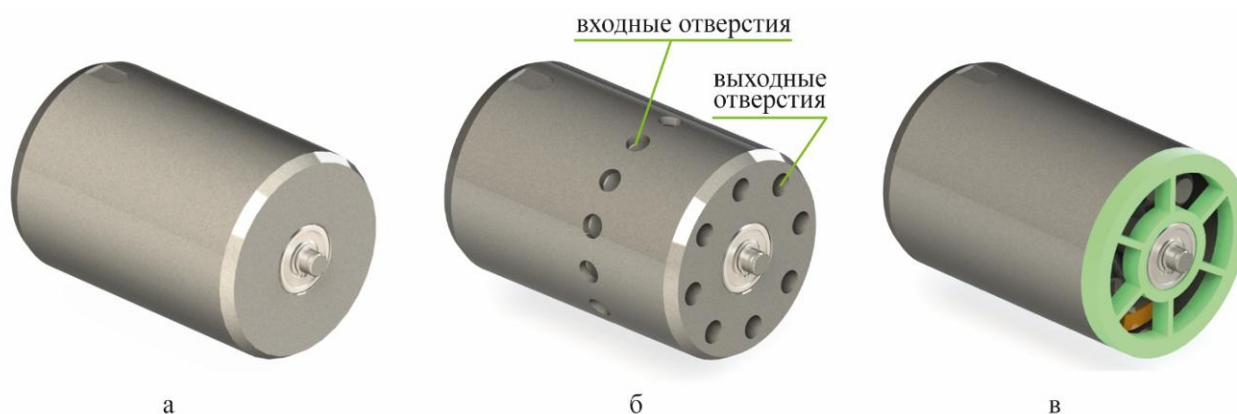


Рис. 4. Общий вид центробежного фрикционного ролика: а – закрытого типа; б – вентилируемого типа; в – открытого типа.

Вентилируемая конструкция тормозного ролика предназначена для снижения нагрева и уменьшения абразивного износа фрикционной пары центробежного тормоза и имеет систему вентиляции нагнетательного типа. Для этого внутри тормозного ролика установлен вентилятор, который работает на основе забора воздуха через входные отверстия в обечайке ролика, продувки воздухом тормоза и последующего удаления воздуха и продуктов износа через выходные отверстия в подшипниковом фланце ролика.

При $K_{ECO} = 1$ центробежный фрикционный ролик имеет открытую с торца ролика конструкцию (рис. 4, в), в которой продукты износа выводятся из ролика путем естественной вентиляции через фланец подшипникового узла ролика, выполненного с ребрами жесткости.

Стоит отметить, что для определения коэффициента K_{ECO} экологичности вентилируемой конструкции фрикционного тормозного ролика (рис. 4, б) необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

При полностью закрытой конструкции центробежного фрикционного ролика (рис. 4, а) [9, 10] $K_{ECO} = 0$.

Для вентилируемой конструкции центробежного фрикционного ролика (рис. 4, б) [10] $1 > K_{ECO} > 0$.

Максимальное количество Br_{\max} торможений паллет при котором будет достигнута предельно допустимая концентрация частиц PM10 $[C_{PM}]$ может быть определено по формуле:

$$Br_{\max} = \frac{[C_{PM}]}{C_{PM10}^1 \cdot t_{br} \cdot i \cdot N_p}, \quad (4)$$

где $[C_{PM}]$ – предельно допустимая концентрация частиц PM10, мкг/м^3 (табл. 1); t_{br} – время одного торможения, с; i – количество тормозных колодок тормозного ролика фрикционного типа.

Стоит отметить, что при определении Br_{\max} следует использовать среднегодовую предельно допустимую концентрацию частиц PM10, что в сочетании с таким показателем, как оборачиваемость блока, может служить комплексной оценкой его экологичности. При этом максимальная оборачиваемость TR_{\max} блока определяется как:

$$TR_{\max} = \frac{Br_{\max}}{N_p} = \frac{[C_{PM}]}{C_{PM10}^1 \cdot t_{br} \cdot i \cdot N_p^2}. \quad (5)$$

При оценке склада в целом, имеющего n блоков, объем рабочей зоны следует определять как:

$$V_W = V_F + \sum_{j=1}^n V_{Wj},$$

где V_F – объем рабочей зоны склада, не занятый блоками, м³; V_{Wj} – объем рабочей зоны j -го блока, определяемого по формуле (3).

В формулах (3) – (5) необходимо использовать общее количество паллетомест в n блоках как:

$$N_P^O = \sum_{j=1}^n N_{Pj}.$$

3. Результаты исследований и их обсуждение

В качестве примера использования методики оценки концентрации частиц PM10 в рабочей зоне блока проведем расчет для склада, состоящего из одного блока гравитационных стеллажей для паллет, показанного на рис. 5.

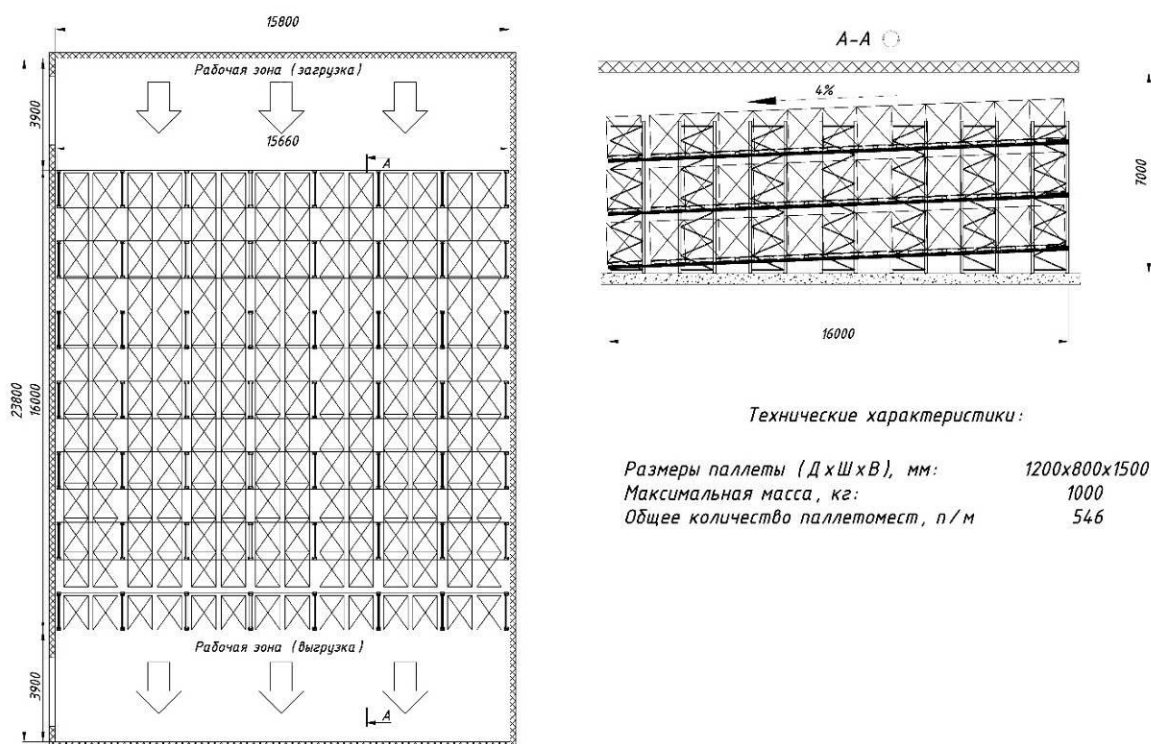


Рис. 5. Склад с использованием одного блока гравитационных стеллажей.

В качестве центрбежного фрикционного ролика, использовалась конструкция, принцип работы которой подробно описан в [11]. На основании анализа экспериментальных исследований [12] зависимость C_V объемной концентрации частиц PM10 при расходе воздуха $Q = 1$ л/мин для различных давлений p на фрикционную накладку центрбежного фрикционного ролика показана на рис. 6.

Графики зависимости максимального Br_{\max} количества торможений и оборачиваемости TR_{\max} склада в зависимости от давления p на фрикционную накладку, полученные по

формулам (4) и (5) при коэффициенте экологичности конструкции центрбежного фрикционного ролика $K_{ECO} = 1$ показаны на рис. 7.

Как видно из рис. 7, максимальное количество торможений обеспечивается при использовании давления на фрикционную накладку $p = 0,1$ МПа, что соответствует массе паллеты $M = 1000$ кг. При этом максимальное количество торможений и оборачиваемость склада равны соответственно $Br_{\max}^{1000} = 8838$ и $TR_{\max}^{1000} = 16,2$.

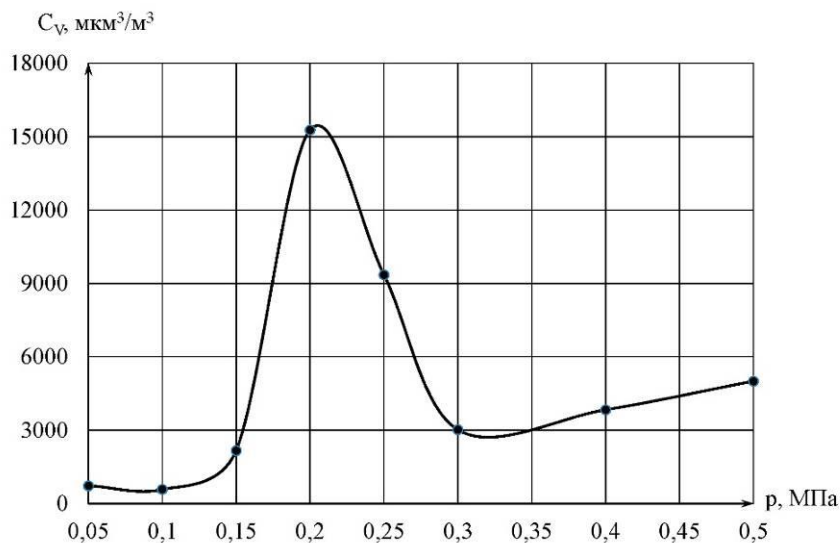


Рис. 6. Зависимость C_V объемной концентрации частиц PM10 при расходе воздуха $Q = 1$ л/мин для различных давлений p на фрикционную накладку центрального фрикционного ролика

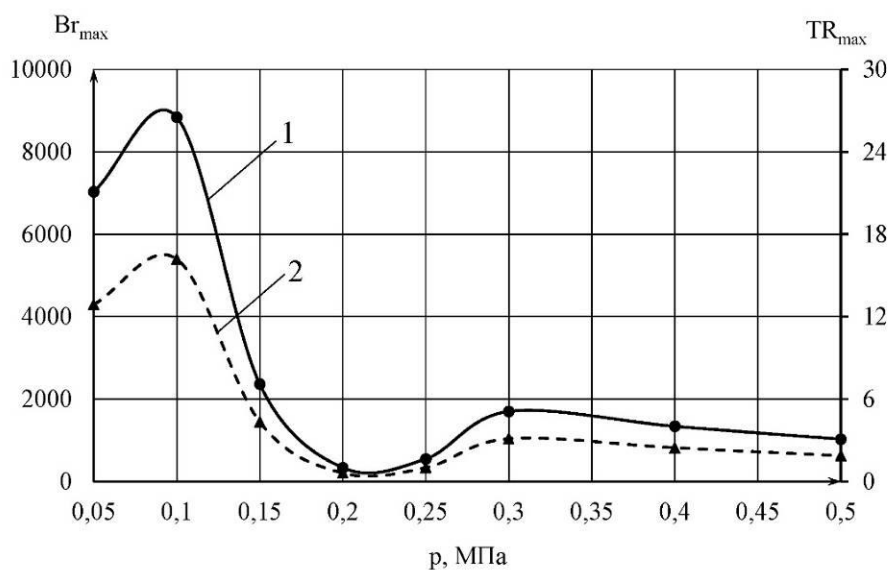


Рис. 7. Зависимости максимального Br_{max} количества торможений (1) и оборачиваемости TR_{max} склада (2) в зависимости от давления p на фрикционную накладку.

При использовании паллет другой массы для обеспечения наибольшей оборачиваемости и максимального количества торможений необходимо скорректировать размеры фрикционной накладки центрального фрикционного ролика.

4. Заключение

1. Предложена методика оценки концентрации мелкодисперсных частиц PM10 в рабочей зоне гравитационного стеллажного

блока для паллет при использовании центрального фрикционного ролика.

2. Объемная концентрация C_V частиц PM10 в рабочей зоне гравитационного стеллажного блока может быть определена из экспериментальных данных по износу пар трения центрального фрикционного ролика с учетом коэффициента K_{ECO} экологичности конструкции центрального фрикционного ролика.

3. Коэффициент K_{ECO} экологичности конструкции центробежного фрикционного ролика является одним из факторов, определяющих максимальное количество торможений, принимает значения от 0 до 1. Значение 0 соответствует полностью закрытой конструкции, исключающей попадание продуктов износа в рабочую зону гравитационного стеллажа; значение 1 – открытой конструкции центробежного фрикционного ролика.

4. Основными показателями экологичности проектного решения склада с использованием гравитационных стеллажных блоков являются максимальное количество Br_{max} торможений и максимальная оборачиваемость

TR_{max} склада, рассчитываемые по формулам (4) и (5).

5. Полученные результаты экспериментального исследования материалов фрикционных пар центробежного фрикционного ролика показывают, что максимальное количество Br_{max} торможений обеспечивается при давлении на фрикционную накладку $p = 0,1$ МПа, что соответствует массе паллеты $M = 1000$ кг. При этом максимальное количество Br_{max} торможений и максимальная оборачиваемость TR_{max} склада равны $Br_{max}^{1000} = 8838$ и $TR_{max}^{1000} = 16,2$.

Список литературы

1. Safronov E., Nosko A. A Method to Determine Allowable Speed for a Unit Load in a Pallet Flow Rack // *Acta Mechanica et Automatica*. 2019. Vol. 13. No. 2. P. 80-85.

2. Сидоренко И.В. Совершенствование методологии комплексной оценки загрязнения воздушного бассейна крупного города для обоснования мониторинга и системы контроля: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 03.00.16. Волгоград. 2008.

3. Рамочный план организации мониторинга взвешенных веществ в атмосфере в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии. ВОЗ, Европейский центр по окружающей среде и охране здоровья. Бонн. 2006. 52 с.

4. РД 52.04.830-2015. Массовая концентрация взвешенных частиц PM10 и PM2.5 в атмосферном воздухе. Методика измерений гравиметрическим методом. СПб. 2015. 41 с.

5. Воздействие взвешенных частиц на здоровье. Значения для разработки политики в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии. Копенгаген: Европейское региональное бюро ВОЗ. 2013. 14 с.

6. Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.3492-17. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений. М: Роспотребнадзор. 2019. 55 с.

7. Просви́ров А.А. Негативное воздействие автотранспорта на окружающую среду.

References

1. Safronov E., Nosko A. A Method to Determine Allowable Speed for a Unit Load in a Pallet Flow Rack. *Acta Mechanica et Automatica*, 2019, Vol. 13, No. 2, pp. 80-85.

2. Sidorenko I.V. Improvement of the methodology for a comprehensive assessment of air pollution in a large city to substantiate the monitoring and control system. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Volgograd. 2008. 20 p. (In Russian)

3. *Ramochnyy plan organizatsii monitoringa vzveshennykh veshchestv v atmosfere v stranakh Vostochnoy Evropy, Kavkaza i Tsentralnoy Azii*: VOZ, Evropejskiy tsentr po okruzhayushchey srede i okhrane zdorovya. Bonn. 2006. 52 p.

4. Guidance document 52.04.830-2015. *Mass rate of suspended particles PM10 and PM2.5 in atmospheric air. Measurement technique by gravimetric method*. SPb. 2015. 41 p. (In Russian)

5. *Vozdeystvie vzveshennykh chastits na zdorove. Znacheniya dlya razrabotki politiki v stranakh Vostochnoy Evropy, Kavkaza i Tsentralnoy Azii*. Kopenhagen, Evropeyskoe regionalnoe byuro VOZ. 2013. 14 p.

6. *Gigienicheskie normativy GN 2.1.6.3492-17. Predelno dopustimye kontsentratsii (PDK) zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosfernom vozdukh e gorodskikh i selskikh poseleniy*. Moscow, Rospotrebnadzor, 2019. 55 p.

7. Prosvirov A.A. The negative impact of

// Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли Юга России: материалы I студ. науч.-техн. конф. (24–26 апреля 2007 г.). Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ. 2007. С. 29 – 30.

8. Nosko, O., Olofsson, U. Effective density of airborne wear particles from car brake materials // *Journal of Aerosol Science*. 2017. Vol. 107. P. 94–106.

9. Patent EP2128048. Bremsrolleneinsatz, Bremsrolle und Rollenbahn / Werner Langer GmbH & Co., 02.12.2009.

10. Пат. 170875 Российская Федерация, МПК В65G 13/075. Ролик тормозной для роликовых гравитационных конвейеров / Носко А.Л., Сафронов Е.В.; заявитель и патентообладатель МГТУ им. Н.Э. Баумана. - №2017105276, заявл. 17.02.2017; опубл. 12.05.2017. Бюл. № 14-2017.

11. Сафронов Е.В., Шарифуллин И.А., Носко А.Л. Устройства безопасной эксплуатации гравитационных роликовых конвейеров паллетного типа. М: Университетская книга, Редакционно-издательский дом РосНОУ, 2018. 72 с.

12. Носко А.Л., Тарасюк В.Е., Шарифуллин И.А., Сафронов Е.В. Триботехническая и экологическая оценка фрикционных пар тормозных устройств подъемно-транспортных машин // *Трение и износ*. 2020. Т. 4. № 4. С. 475-484.

vehicles on the environment. In: *Youth and scientific and technological progress in the road industry of the South of Russia: materials I stud. scientific and technical conf.* Volgograd, 2007, pp. 29 - 30. (In Russian)

8. Nosko O., Olofsson U. Effective density of airborne wear particles from car brake materials. *Journal of Aerosol Science*, 2017, Vol. 107, pp. 94–106.

9. Patent EP2128048. Bremsrolleneinsatz, Bremsrolle und Rollenbahn / Werner Langer GmbH & Co., 02.12.2009.

10. Patent RU 170875. *Rolik tormoznoj dlya rolikovykh gravitacionnykh konvejerov* [Brake roller for roller gravity conveyors]. Nosko A.L., Safronov E.V. Declared 17.02.2017. Published 12.05.2017. Bulletin No. 14-2017.

11. Safronov E.V., Sharifullin I.A., Nosko A.L. *Ustroystva bezopasnosnoy ekspluatatsii gravitatsionnykh rolikovykh konveyerov palletnogo tipa* [Devices for the safe operation of pallet-type gravity roller conveyors]. Moscow, Universitetskaya kniga, Redaktsionno-izdatel'skiy dom RosNOU, 2018. 72 p. (In Russian)

12. Nosko A.L., Tarasyuk V.E., Sharifullin I.A., Safronov E.V. Tribotechnical and environmental assessment of friction pairs of braking devices of hoisting-and-transport machines. *Trenie i iznos*, 2020, No. 4, pp. 475-484. (In Russian)

УДК (UDC) 621.86, 621.644

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ
ЛИНЕЙНО-ПРОТЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОБЖИМНЫХ УСТРОЙСТВLOAD STUDY OF THE LINEAR-EXTENDED STRUCTURES
WHEN USING CRIMPING DEVICESХимич А.В., Артемова А.А., Перминова Д.И., Лагереv И.А.
Khimich A.V., Artyomova A.A., Perminova D.I., Lagerev I.A.Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)
Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Аннотация. В статье представлены научные подходы к исследованию напряженно-деформированного состояния линейно-протяженных конструкций, содержащих обжимные устройства. К примерам таких конструкций можно отнести канатные системы, трубопроводы для транспортировки сред под давлением. В статье подробно рассмотрено исследование напряженно-деформированного состояния газопровода, на который установлена муфта стягивающаяся стальная, используемая для ремонта подводных участков.

Ключевые слова: линейно-протяженная конструкция, обжимное устройство, напряженно-деформированное состояние.

Дата принятия к публикации: 25.01.2022
Дата публикации: 25.03.2022

Сведения об авторах:

Химич Анна Васильевна – аспирант ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»,
e-mail: annahimich14@mail.ru.

Артемова Анна Алексеевна – студент ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»,
e-mail: a.artemova25@yandex.ru.

Перминова Диана Игоревна – студент ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»,
e-mail: di.perm01@mail.ru.

Лагереv Игорь Александрович – доктор технических наук, доцент, проректор по инновационной работе ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского», e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.
ORCID: 0000-0002-0921-6831

Abstract. The article presents scientific approaches to the study of the stress-strain state of linearly extended structures containing crimping devices. Examples of such structures include rope systems, pipelines for transporting media under pressure. The study of the stress-strain state of a gas pipeline on which a steel coupling used for the repair of substructures is installed is considered in detail.

Keywords: linear-extended structure, crimping device, stress-strain state.

Date of acceptance for publication: 25.01.2022
Date of publication: 25.03.2022

Authors' information:

Anna V. Khimich – student, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,
e-mail: annahimich14@mail.ru.

Anna A. Artyomova – student, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,
e-mail: a.artemova25@yandex.ru.

Diana I. Perminova – student, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,
e-mail: di.perm01@mail.ru.

Igor A. Lagerev - Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Vice rector for Innovations, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,
e-mail: lagerev-bgu@yandex.ru.
ORCID: 0000-0002-0921-6831

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-1543.2022.4

Acknowledgements

The study was supported by Presidential Grant for Governmental Support to Young Russian Scientists No. №MD-1543.2022.4

1. Введение

Линейно-протяженные конструкции получили широкое распространение в строительстве и машиностроении. К примерам таких конструкций можно отнести канатные транспортные системы (рис. 1) [1-3] и магистральные трубопроводы для транспортировки углеводородов [4].

а)



б)



Рис. 1. Канатные транспортные системы:
 а – стационарная подвесная канатная дорога;
 б – мобильный транспортно-перегрузочный канатный комплекс для лесозаготовки

В ходе сооружения или ремонта линейно-протяженной конструкции могут использоваться различные обжимные устройства. Например, для канатной транспортной системы это может быть узел соединения двух канатов (рис. 2). При ремонте дефектных подводных участков газопроводов применяются муфты стягивающиеся стальные (рис. 3 и рис. 4).

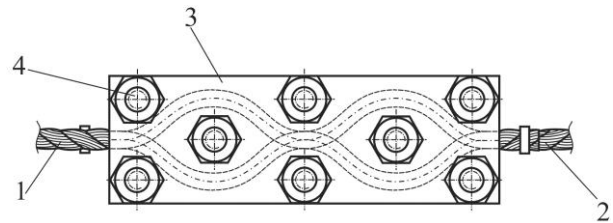


Рис. 2. Узел соединения двух канатов:
 1, 2 – скрепляемые канаты; 3 – зажимное устройство в виде двух параллельных пластин; 4 – болтовые соединения, обеспечивающие обжатие канатов



Рис. 3. Муфта стягивающаяся стальная, установленная на газопровод

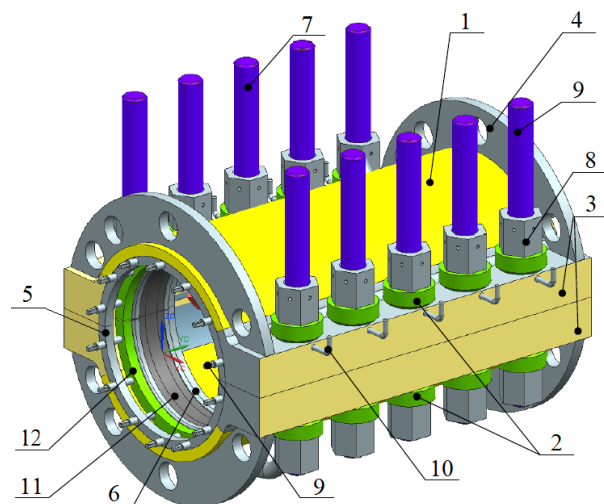


Рис. 4. Муфта стягивающаяся стальная для ремонта подводных участков магистральных газопроводов:
 1 – корпус; 2 – бобышка; 3 – фланец;
 4 – полукольцо; 5 – полукольцо;
 6 – ребро; 7 – шпилька; 8 – гайка;
 9 – шпилька малая; 10 – фиксатор;
 11 – манжетное уплотнение; 12 – вкладыш

Обжимное устройство оказывает воздействие на линейно-протяженный объект, благодаря чему достигается необходимый эффект от его применения. Данная статья посвящена вопросам моделирования напряженно-деформированного состояния линейно-протяженной конструкции методом конечных элементов при использовании обжимных устройств на примере использования муфты стягивающейся стальной для ремонта магистрального газопровода с номинальным диаметром 1220 мм.

2. Методика расчета муфты методом конечных элементов

В ходе исследования с учетом рекомендаций [4, 5] была разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния системы «газопровод – муфта стальная стягивающаяся» методом конечных элементов.

Общий вид конечноэлементной модели системы «газопровод – муфта стальная стягивающаяся» показан на рис. 5.

Так как муфта имеет сложную форму, то она в расчете аппроксимировалась объемными конечными элементами. Труба газопровода является тонкостенным элементом, поэтому она аппроксимировалась плоскими конечными элементами. Сшивка двух типов

конечных элементов выполнена с использованием специальных конечных элементов, связывающих степени свободы.

В ходе исследования применялась стратегия ручного построения конечноэлементной сетки, так как было необходимо пристыковать объемные конечные элементы муфты к плоским конечным элементам трубопровода.

Так как аналитические расчеты показали, что наибольшие напряжения в конструкции в большинстве случаев возникают в нормальном режиме работы газопровода (при номинальном давлении газа в трубопроводе), то конечноэлементные расчеты выполнены для этого режима [4].

С двух сторон от разъема муфты, состоящей из двух половин, в центрах отверстий под шпильку добавлялись дополнительные конечноэлементные узлы (рис. 6). С каждой стороны эти дополнительные узлы связывались абсолютно жесткими конечными элементами с узлами конечных элементов, примыкающих к отверстию. Два дополнительных узла, размещенных с разных сторон разъема, связывались упругим конечным элементом, моделирующим шпильку. К дополнительным узлам вдоль осевой линии отверстия также приложено усилие предварительного натяжения шпильки 1018 кН.

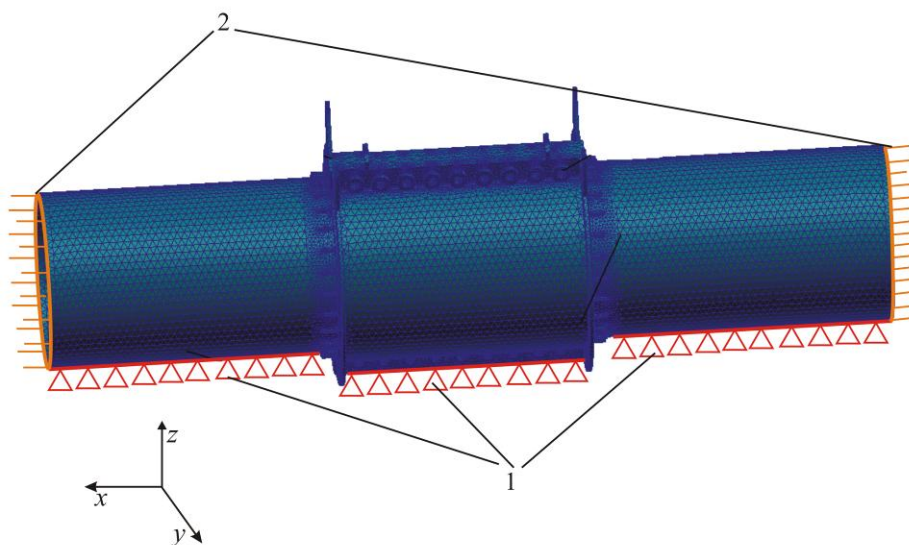


Рис. 5. Конечноэлементная модель муфты с креплениями:

- 1 – крепление по всем направлениям по нижней линии и вдоль трубопровода и муфты;
- 2 – крепление вдоль оси трубопровода (вдоль оси x)

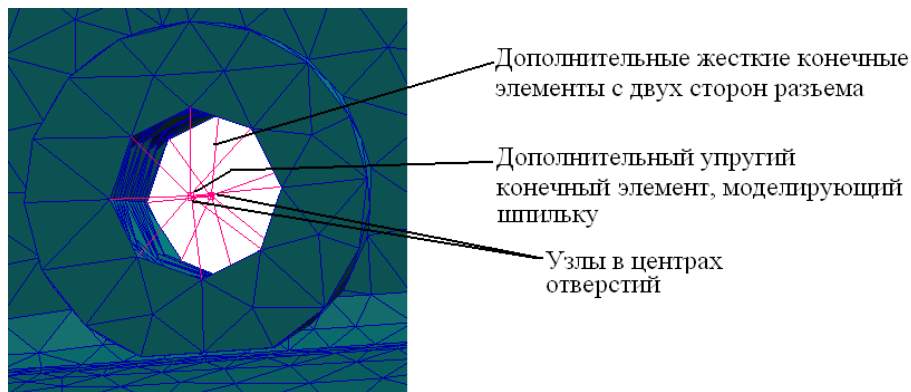


Рис. 6. Моделирование шпилек разреза муфты

В качестве действующих функциональных нагрузок согласно табл. 14 п. 12.2.1 СП 36.13330.2012 и СП 20.13330.2016 при расчете были рассмотрены следующие постоянные нагрузки:

- нормативная нагрузка от рабочего давления транспортируемого газа;
- нормативная нагрузка от гидростатического давления воды;
- нормативная вертикальная нагрузка от веса насыпного грунта;
- нормативная горизонтальная нагрузка от бокового давления веса насыпного грунта;
- нормативная вертикальная нагрузка от веса трубы;
- нормативная вертикальная нагрузка от веса муфты и наполнителя.

Распределенные нагрузки приложены в виде нагрузки типа «Давление». Среди них: нормативная нагрузка от рабочего давления транспортируемого газа 7,5 МПа; нормативная нагрузка от гидростатического давления воды на газопровод и муфту 0,4 МПа (для глубины расположения 40 м).

Нормативные вертикальные нагрузки от веса учитывались с помощью постоянного ускорения свободного падения. Также были приложены указанные выше усилия затяжки шпилек.

3. Результаты расчета муфты

На рис. 7 – 9 приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния конструкции. Для оценки влияния муфты на газопровод расчеты выполнены с установкой и без установки муфты.

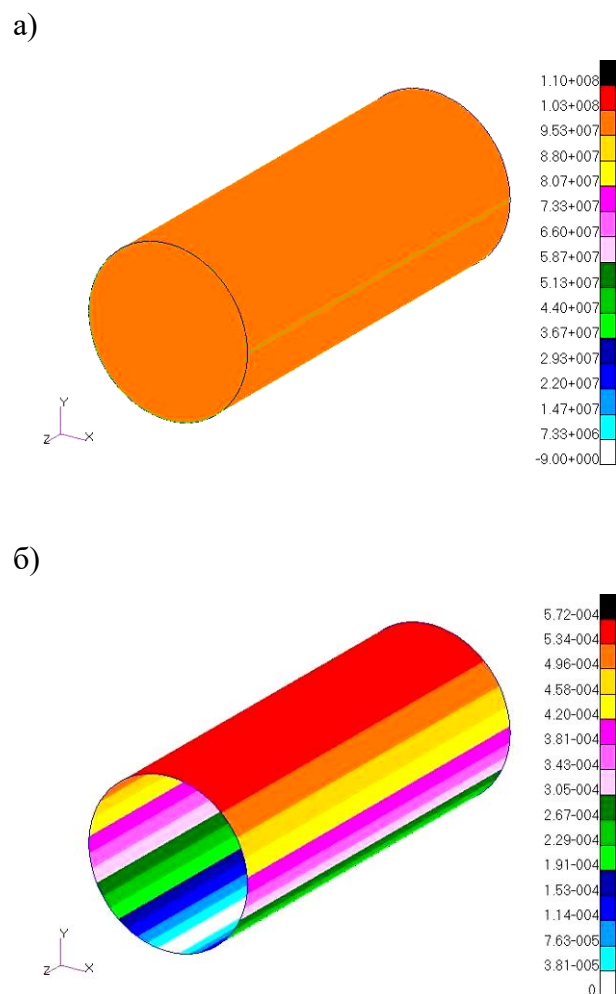


Рис. 7. Результаты расчета газопровода без установки муфты: а – эквивалентные напряжения в конструкции, Па; б – деформации, м

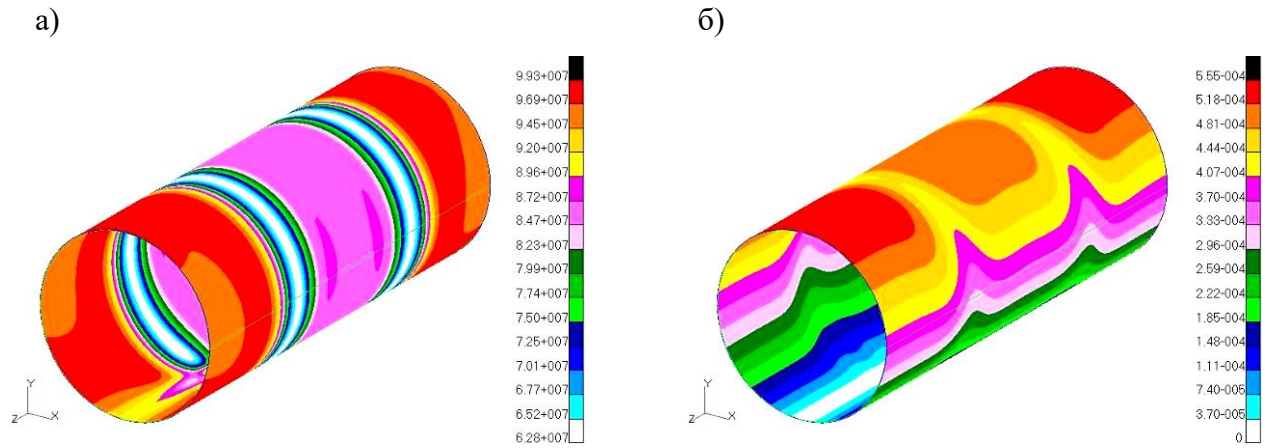


Рис. 8. Результаты расчета трубопровода при установке муфты:
 а – эквивалентные напряжения в конструкции, Па; б – деформации, м

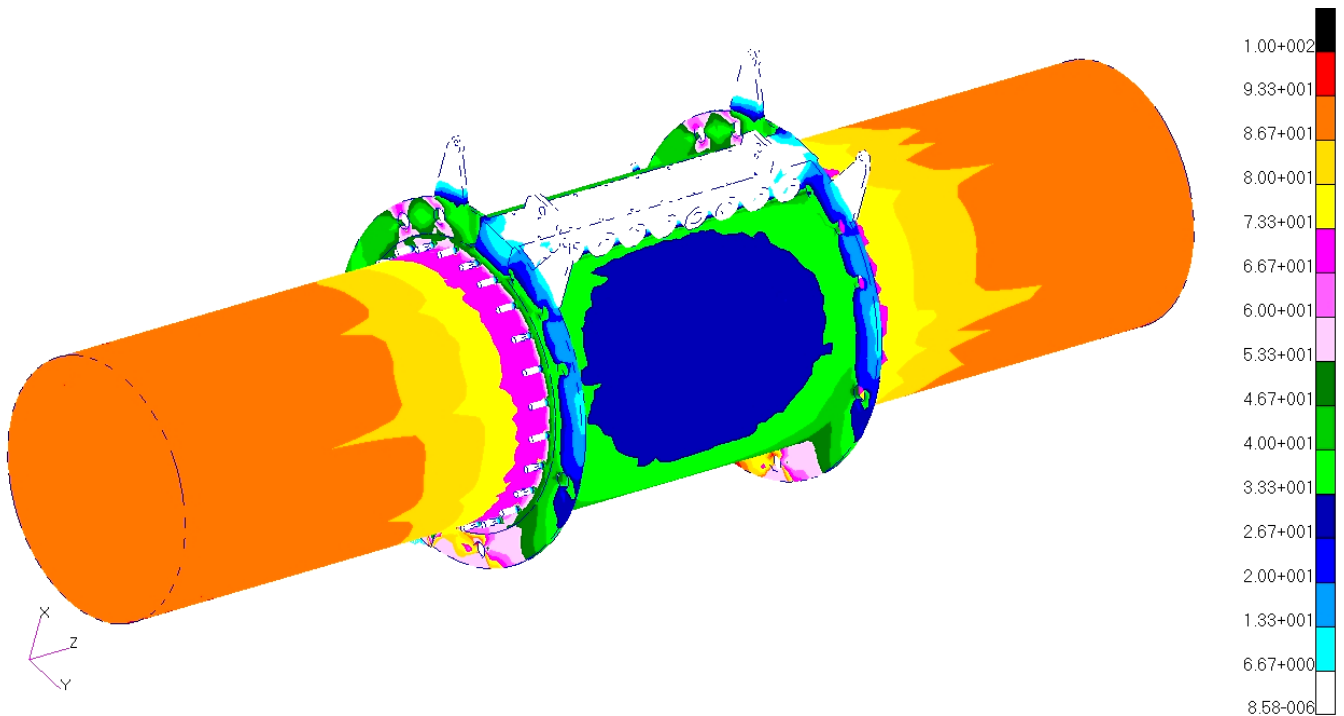


Рис. 9. Результаты расчета эквивалентных напряжений в муфте, МПа

Муфты стальные стягивающиеся применяются для ремонта дефектов газопроводов, представляющих собой потерю металла в результате коррозии или иного воздействия. С использованием разработанной модели проанализировано влияние потери металла на величину максимальных эквивалентных напряжений σ в газопроводе (рис. 10). При этом в области дефекта установлена муфта. Глубина дефекта определяется толщиной стенки газопровода S . При номинальном диаметре газопровода 1220 мм номинальная толщина стенки S была принята равной 40 мм.



Рис. 10. Зависимость максимальных эквивалентных напряжений в газопроводе в зависимости от S

4. Основные выводы

На основе результатов исследования можно сделать следующие выводы.

1. Обжимные устройства вносят свой вклад в напряженно-деформированное состояние линейно-протяженной конструкции. Усилия обжатия приводят к возникновению сжимающих напряжений, которые складываются с нормально действующими напряжениями. В случае с канатами наличие обжимных устройств увеличивает суммарные напряжения. В случае с трубопроводами, испытываемыми растягивающие напряжения от воздействия внутреннего давления, суммарные напряжения уменьшаются.

Список литературы

1. Пат. 2337023 Рос. Федерация: МПК7 В61В 7/00. Мобильная подвесная канатная дорога / Короткий А.А., Хальфин М.Н., Маслов В.Б. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ. № 2007102705/11; заявл. 24.01.2007; опублик. 27.10.2008, Бюл. 30.
2. Лагерев 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.
3. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Оптимальное проектирование линий канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2015. Т.1. № 1. С. 57-65.
4. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Говоров В.В. Прочностной анализ коннектора для подводных переходов магистральных газопроводов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2011. №3. С. 31-37.
5. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Мильто А.А. Универсальная методика определения напряжений в стержневых элементах конструкций гидравлических кранов-манипуляторов в задачах динамики // Вестник Брянского государственного университета. 2013. №4. С. 21-27.

2. Установка муфты стальной стягивающейся на газопровод приводит к снижению на 15...45% величины действующих напряжений. При этом меньшие значения соответствуют участку трубопровода внутри муфты, большие – участкам установки манжетных уплотнений.

3. Напряжения в трубопроводе соответствуют допускаемым при $S \approx 24$ мм (красные линии на графике, показанном на рис. 10). Напряжения в трубе соответствуют номинальному значению (для режима Д0) при $S_{min} \approx 31$ мм (зеленые линии на графике линии на графике, показанном на рис. 10). Таким образом, необходимо минимальное значение $S = 31$ мм.

References

1. Patent RU 2337023, B61B 7/00. Mobilnaya podvesnaya kanatnaya doroga [Mobile ropeway]. Korotkiy A.A., Khalphin M.N., Maslov V.B. Published 27.10.2008. (In Russian)
2. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P. General stability of a base vehicle of a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 210-220. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-210-220 (In Russian)
3. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of cable subway lines in a highly urbanized city environment. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2015, Vol.1, No.1, pp. 57-65. (In Russian)
4. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Govorov V.V. Strength analysis of the connector for underwater crossings of main gas pipelines. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, No.3, pp. 31-37. (In Russian)
5. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Milto A.A. Universal technique for stress analysis of beam elements of articulating cranes in case of dynamic load. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2013, No.4, pp. 21-27. (In Russian)

УДК (UDC) 551.583.13

АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ В ВЕРХОВЬЯХ
БАССЕЙНА РЕКИ АМУДАРЬЯ В ТАДЖИКИСТАНЕANALYSIS OF CLIMATE VARIABLES IN THE UPPER AMU DARYA
RIVER BASIN IN TAJIKISTANГулахмадов А.А.
Gulakhmadov A.A.Синьцзянский институт экологии и географии Китайской академии наук (Урумчи, КНР)
Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences (Urumqi, PRC)

Аннотация. В данной статье представлены результаты анализа осадков, максимальных и минимальных температур на различных территориях Таджикистана. Анализ показал, что на юге Таджикистана тренд летнего и зимнего периода времени года показывает положительный фактор, и температура растёт летом и зимой, за исключением двух станций наблюдения-Рашит и Мургаб, где зафиксирована аномальная погода. На севере и в центральной части Таджикистана также положительный тренд лета и зимы. Восточная часть Таджикистана, где начинается высотная территория, тренд температуры показывает, что летний период времени года становится немного прохладнее, а зимний период показывает повышенный тренд температуры, т.е. становится теплее. На равнинных участках территории Таджикистана просматривается относительный рост выпадения осадков, а количество осадков в высокогорной зоне (восточный Памир) по многолетним данным уменьшается. Это изучение показывает ярко выраженные климатические колебания изменения температуры воздуха и осадков в Таджикистане.

Ключевые слова: тренд, осадки, максимальная температура, минимальная температура, Таджикистан.

Дата принятия к публикации: 18.01.2022
Дата публикации: 25.03.2022

Сведения об авторе:

Гулахмадов Аминджон Абдуджабборович – постдокторант Синьцзянского института экологии и географии Китайской академии наук,
e-mail: agulakhmadov@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7289-8310

Abstract. This article presents the results of the trend analysis of precipitation, maximum and minimum temperatures in the upstream of Amu Darya River Basin in Tajikistan. The result showed that in the south part of Tajikistan the trend of the summer and winter seasons indicate a positive and the temperature rises in summer and winter. In the north and central part of Tajikistan, there is also a positive trend in summer and winter with the exception of the Rasht and Murgab stations, where was recorded a decreasing trend in air temperature in summer. The eastern part of Tajikistan, where the high-altitude territory begins, the temperature trend shows that the summer period of the year becomes slightly cooler, and the winter period shows an increasing temperature trend, i.e. it is getting warmer. On the flat plain areas of Tajikistan, a relative increase in precipitation is observed, and the amount of precipitation in the high-mountain zone (eastern Pamir) decreases according to long-term data. This study shows pronounced climatic fluctuations in Tajikistan, changes in air temperature and precipitation conditions.

Keywords: trend, precipitation, maximum temperature, minimum temperature, Tajikistan.

Date of acceptance for publication: 18.01.2022
Date of publication: 25.03.2022

Author's information:

Aminjon A. Gulakhmadov – Postdoctoral fellow at the Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences,
e-mail: agulakhmadov@gmail.com
ORCID: 0000-0002-7289-8310

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке программы Международной инициативы по стипендиям президента Китайской академии наук (проект 2021PC0002), Исследовательского фонда для международных ученых Национального фонда естественных наук Китая (проект 42150410393), Программы "Сотня талантов Синьцзян Тяньчи"(проект Y848041)

Acknowledgements

The study was supported by the CAS PIFI fellowship (project No. 2021PC0002), Research Fund for International Scientists of National Natural Science Foundation of China (project No. 42150410393), Xinjiang Tianchi Hundred Talents Program (project No. Y848041)



1. Введение

Климат меняется на Земле и погода определяется как ежедневное состояние атмосферы. Погода - это хаотическая нелинейная динамическая система. Климат является усредненным состоянием погоды, и он предсказуем. Климат включает в себя такие показатели как средняя температура, количество осадков, количество солнечных дней и другие переменные, которые могут быть измерены в конкретном месте наблюдения. Однако есть также и другие процессы на Земле, которые могут повлиять на климат. Изменение климата является одним из самых актуальных и сложных проблем современного общества, которая затрагивает практически все аспекты его жизнедеятельности. Согласно Межправительственной Группе Экспертов по Изменению Климата (МГЭИК), глобальное потепление за последние сто лет достигло критических значений, и тенденция дальнейшего роста ставит под угрозу благоприятное существование природных ресурсов и устойчивость экономики стран мира [1]. Погодные явления, которые по своей интенсивности, продолжительности во времени могут нанести значительный ущерб отдельным отраслям экономики и создать угрозу безопасности людей [2]. Тенденция глобального потепления стала очевидной и она связана с проблемой изменения климата [3].

В предыдущих исследованиях можно было наблюдать тенденцию изменения температуры и осадков в горной части Центральноазиатского региона. З. Шу и др. [4] проанализировали многолетний тренд температуры и осадков на Тибетском плато. Результаты анализа показали, что температура в течение последних нескольких десятилетий показывала долгосрочную тенденцию к потеплению. Однако на одной из 38-и исследованных станций наблюдалась тенденция к снижению. Количество осадков на Тибетском плато увеличилось в большинстве регионов исследуемой области. За последние несколько десятилетий можно выделить восточную и центральную части Тибетского плато. Однако западный Тибетский регион за тот же период показал тенденцию к сниже-

нию [4]. Также [3] изучали пространственно-временную изменчивость температуры воздуха и осадков на основе долгосрочных наблюдений метеорологической станции над горами Тянь-Шань в Центральной Азии. Результаты его исследования показали, что горы Тянь-Шань испытали общее быстрое потепление и увлажнение в течение периода исследования со средней скоростью потепления $0,32$ °C/десятилетие и скоростью увлажнения $5,82$ мм/десятилетие. Годовой и сезонный пространственный ход температуры имел разные масштабы в разных регионах. Годовое количество осадков показало незначительную тенденцию к увеличению на 20 станциях, а на 6 станциях – значительную тенденцию к увеличению. Температуры в Восточном Тянь-Шане росли быстрее всего со скоростью $0,41$ °C/десятилетие [3]. Изменения температуры воздуха и количества осадков в горах Тянь-Шань не только повлияли на изменения ледников, но и повлияли на гидрологические системы, которые снабжают водой примерно 50 миллионов человек в Кыргызстане, Казахстане, Узбекистане, северном Таджикистане и провинции Синьцзян в Китае и поддерживают сельское хозяйство в низовьях, городских районах и промышленности в этих регионах [5, 6].

Территория Таджикистана находится на стыке влияния нескольких мощных процессов атмосферной циркуляции. Один из них – Сибирский антициклон зимой. Волны холода из Арктики достигают территории юго-западного Таджикистана, а горы, граничащие со страной с севера и востока, способствуют удержанию холодных воздушных масс. Приток теплого воздуха зимой, как правило, происходит с проникновением тропических воздушных масс. Летом преобладает другой важный атмосферный процесс – термальная депрессия. Его формированию способствует близость пустынь, высоких гор, и характерна ясная, сухая и жаркая погода. Сильные дожди часто приносят юго-западные циклоны в зимне-весенний период [7].

Среднегодовые температуры, в зависимости от высоты местности, колеблются от $+17$ °C в жарких южных пустынях до -6 °C и ниже в высокогорьях Памира. Самые высокие

температуры наблюдаются в июле, самые низкие – в январе. В долинах и предгорьях она колеблется от +6 до +17 °С, а в альпийских районах высокогорья, например, на Западном Памире климат суров и среднегодовая температура здесь близка к 0 °С, а на малых высотах поднимается от +6 до +8 °С. Климат суров на Восточном Памире (территория метеостанций Мургаб и Хорог), где среднегодовая температура колеблется от –1 до –6 °С мороза [8]. Восточный Памир (Булункуль) отличается особенно суровым климатом, где минимальная температура достигает –65 °С [7]. На юге страны абсолютный максимум достигает +47 °С (район Шартуз). Таким образом, разница между максимальной и минимальной температурами в разных частях страны превышает 100 °С [9].

В холодное время года на территории Таджикистана выпадает около 75% годовых осадков. В горных районах выпадает большая часть осадков, которые открыты для влажных воздушных масс, поступающих с запада. Высокие горы создают эффект орographic затенения и отделяют участки от влажных масс, в которых выпадает малое количество осадков. К ним относятся глубокие и узкие горные долины и высокогорное плато на востоке Памира, для которого характерно наименьшее количество осадков – менее 100 мм в год [7]. Среднегодовое количество осадков в жарких пустынях южного Таджикистана и холодных альпийских пустынях Восточного Памира колеблется от 70 до 160 мм, в то время как в Центральном Таджикистане количество осадков может превышать 1800 мм [10].

2. Постановка задачи исследования

Целью данного исследования является понимание пространственно-временных характеристик температуры воздуха и осадков в период 1936–2015 гг. на территориях кли-

матических станций разной высоты в Таджикистане. Обсуждаются существенные периодические изменения и зависимость трендов температуры воздуха и осадков от высоты. Результаты предоставят полезную информацию для оценки воздействия изменения климата в Таджикистане.

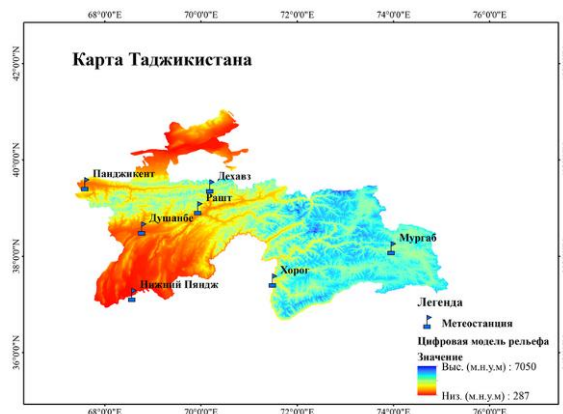


Рис. 1. Регион исследования и расположение климатических станций

Месячные данные о температуре и осадках на семи метеорологических станциях района исследования были получены за период 1936–2015 гг. Метеорологические данные были предоставлены Агентством по гидрометеорологии Комитета по охране окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан (табл. 1). Диапазон высот между станцией Нижний Пяндж и станцией Мургаб составляет около 3250 м. Климатическая станция Нижний Пяндж расположена в нижнем течении реки Пяндж, а станция Мургаб расположена в верховьях реки Пяндж. Цифровая модель рельефа с пространственным разрешением 90 м было получено с веб-сайта Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [11]. Согласно Цифровой модели рельефа, высота над уровнем моря в Таджикистане колеблется от 287 до 7050 м (рис. 1).

Таблица 1

Климатические станции с указанием долготы, широты, высоты, и периодов наблюдений

Код станции	Станция	Широта	Долгота	Высота н.у.м. (м)	Средняя годовая температура (°С)	Общее годовое количество осадков (мм)	Период
38954	Хорог	37.5	71.5	2075	9.07	1923.1	1936–2015
38734	Дехавз	39.45	70.2	2561	4.43	2292.1	1936–2015

Окончание табл. 1

од стан-ции	Станция	Широта	Долгота	Высота н.у.м. (м)	Средняя годовая температура (°C)	Общее годовое количество осадков (мм)	Период
38851	Рашт	39	69.95	1316	10.9	4962.5	1936–2015
38705	Пенджикент	39.5	67.6	1015	12.7	2731.27	1936–2015
38836	Душанбе	38.58	68.78	803	14.77	4891.3	1936–2015
38938	Нижний Пяндж	37.2	68.58	327	16.44	2649.52	1936–2015
38878	Мургаб	38.17	73.97	3576	-1.1	513.88	1936–2015

3. Результаты и их анализ

Климат Таджикистана резко континентальный, что приводит к большим сезонным колебаниям температур. Этот большой разброс проявляется в горном рельефе страны (диапазон высот от 290 до 7114 м над уровнем моря), поскольку горы занимают более 93% территории страны, и более половины территории находится на высоте более 3000 м над уровнем моря. Температуры в Таджикистане строго контролируются высотами; чем выше расположение, тем обычно ниже температура. Таким образом, учет высоты считался важным для объяснения пространственных колебаний температуры в Таджикистане.

На рис. 2 показано, что область исследования характеризуется высокой температурой в течение 5 месяцев со среднегодовым изменением от 12,9 °C на станции Мургаб (на востоке) и 29,26 °C на станции Нижний Пяндж (на юге) в течение всего года. При этом наблюдалось, что температура уменьшается в течение лета. Также было отмечено, что самыми жаркими месяцами были июнь, июль и август, а самыми холодными месяцами были январь, февраль и декабрь на большинстве станций. Максимальное количество осадков было отмечено в марте и апреле на шести климатических станциях, за исключением станции Мургаб, где максимальное количество осадков наблюдается в мае, июне, июле и августе. На территории станции Мургаб выпадает небольшое количество осадков, однако в основном они выпадают в летнее время года, в отличие от других шести станций, где в основном осадки выпадают в весенний период.

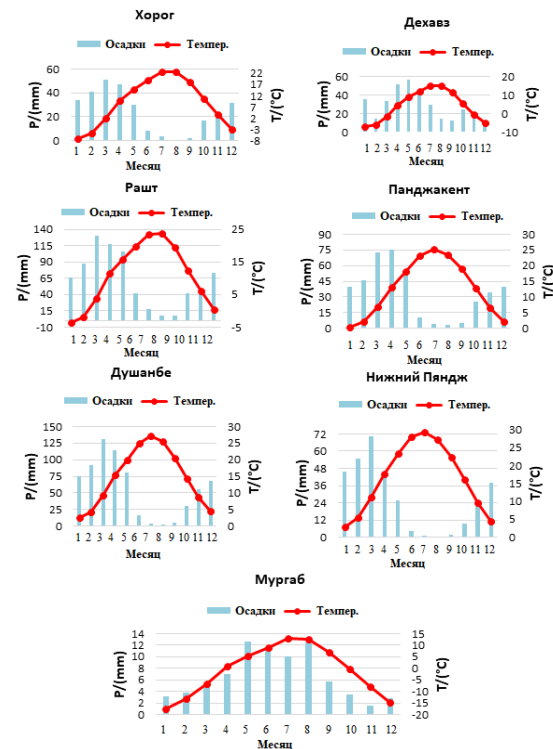


Рис. 2. Среднемесячное распределение температуры и осадков на исследуемой территории

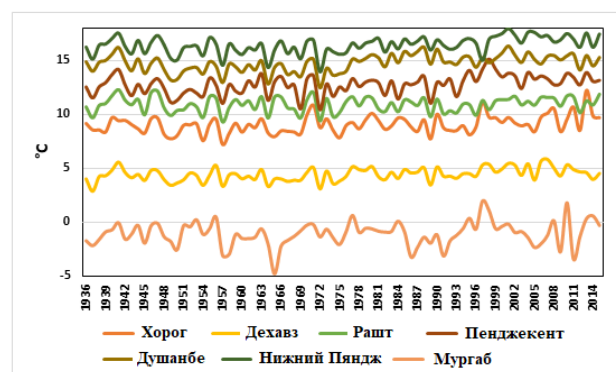


Рис. 3. Среднегодовая температура на исследованных станциях (°C) в период 1936–2015 гг.

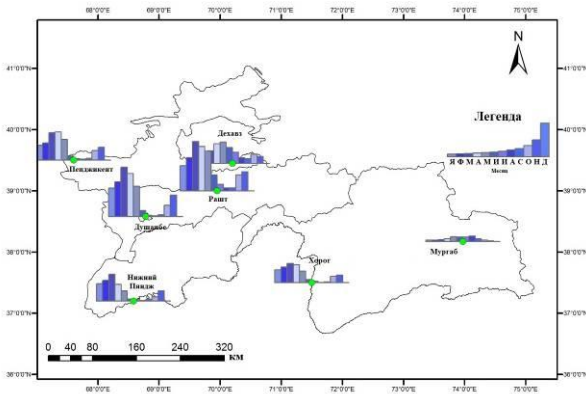


Рис. 4. Распределение осадков по месяцам в разных районах Таджикистана

Таблица 2

Годовые тренды изменения температуры (°C) за десятилетие в период 1936–2015 гг.

	Хорог	Дехавз	Рашт	Пенджикент	Душанбе	Нижний Пяндж	Мургаб
Тренд/Десятилетие	0.13	0.103	0.044	0.164	0.139	0.14	0.072

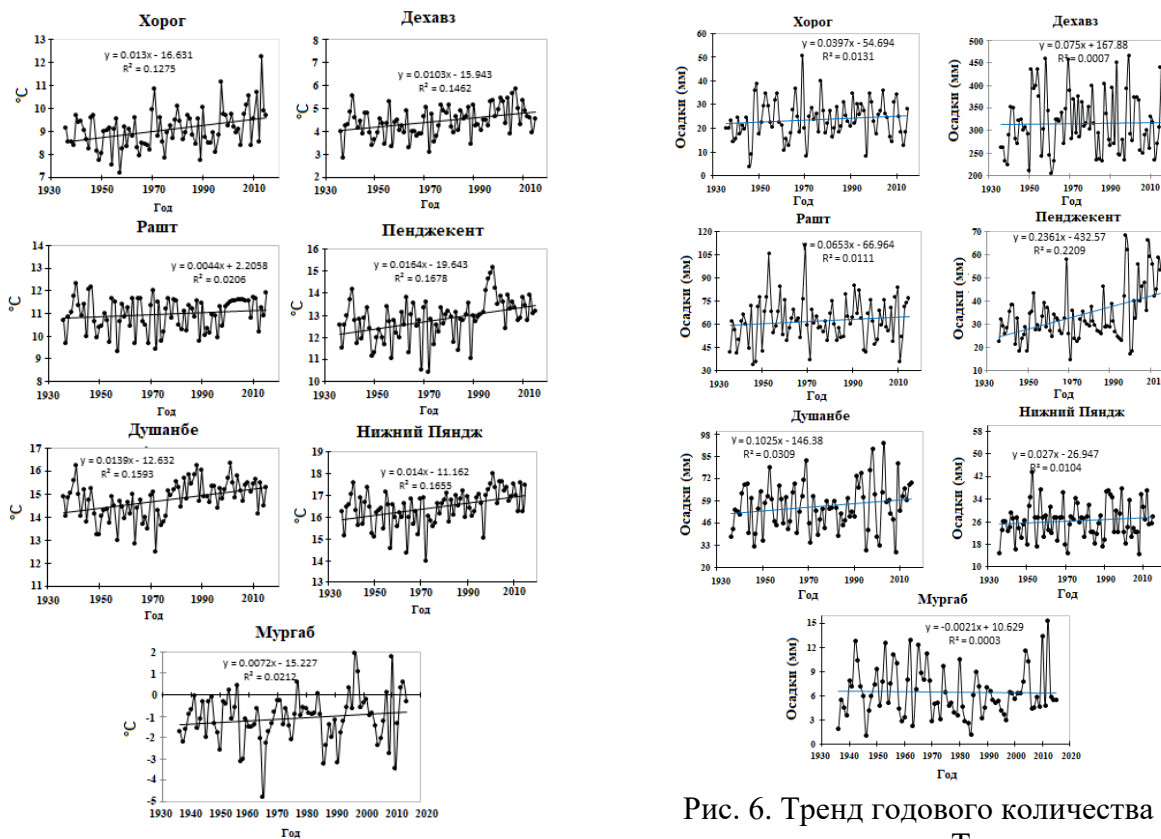


Рис. 5. Тренд среднегодовых температур на метеостанциях в Таджикистане в период 1936–2015 гг.

Рис. 6. Тренд годового количества осадков на метеостанциях в Таджикистане в период 1936–2015 гг.

Как видно на представленном рис. 3 температурный тренд на исследуемых станциях симметричен. Разница высоты расположения над уровнем моря, резко выделяется на указанном графике, т.е. среднегодовая температура зависима от места и высоты объекта.

Таджикистан расположен примерно между широтами 37° и 41° северной широты и

68° и 75° восточной долготы (рис. 4). Динамика месячного выпадения осадков на карте Таджикистана в каждом исследуемом районе. При этом период максимального выпадения осадков колеблется между временами года весна – лето. Станции, расположенные в равнинных участках (на низких высотах) подвержены весеннему периоду максимальных осадков, а на высокогорных станциях выпадение осадков преимущественно происходит с наступлением летнего периода времени.

На рис. 5 отчетливо наблюдается тренд общего повышения температурного фона в республике Таджикистан. Зависимость между высотой расположения станции сохраняется, т.е. в высокогорной зоне тренд повышения температурного фона немного ниже.

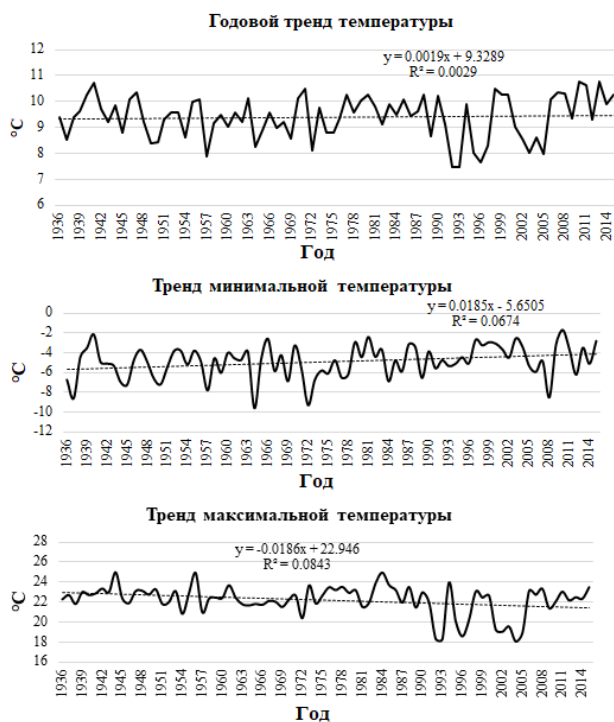


Рис. 7. Тренды средней, минимальной и максимальной температуры

Зависимость выпадения осадков (рис. 6) по многолетним данным наблюдения немного зависит от повышения температуры. Если на равнинных участках территории республики просматривается относительный рост выпадения осадков, то количество осадков в высокогорной зоне (восточный Памир) по многолетним данным уменьшается.

На общих графиках многолетних данных по температуре (рис. 7), для всех семи метеостанций, можно видеть, что на общем фоне роста годовой температуры произошёл относительный рост и увеличение общей минимальной температуры, а общий тренд по максимальной температуре сильно уменьшился.

Судя по полученному графику, в летний период времени года температура постепенно уменьшается. Из этого можно сделать вывод, что зимний период времени года стал намного теплее, а летний период времени года стал более прохладным (рис. 8). Общий итог по данным многолетней температуры показывает, что тренд в зимний период увеличился, что подтверждает рост относительной минимальной температуры (рис. 9). Такая же ситуация прослеживается в весенний и осенний период.

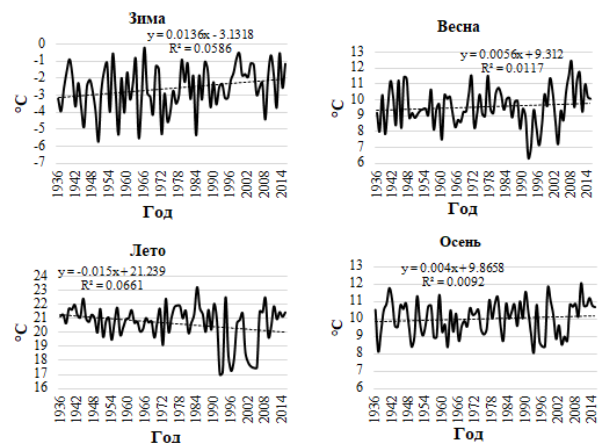


Рис. 8. Тренды температуры для периодов времени года по данным семи метеостанций в Таджикистане

Все климатические станции указали, что средняя температура повысилась зимой на всех климатических станциях Хорог, Дехавз, Пенджикент, Душанбе, Нижний Пяндж, Рашт и Мургаб в период 1936–2015 гг. Однако среди всех семи климатических станций Рашт и Мургаб указали на тенденцию к снижению летней температуры.

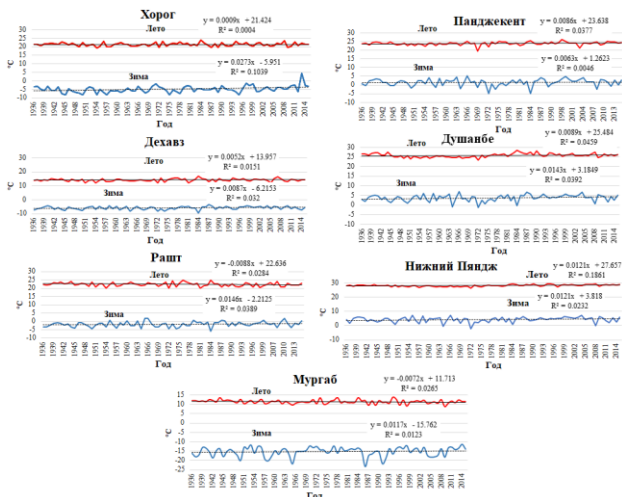


Рис. 9. Тренды летних и зимних температур (°C) в период 1936–2015 гг. для семи метеостанций

Таджикистан считается одной из самых уязвимых стран к последствиям изменения климата по отчетам Всемирного Банка [12]. Ожидаются изменения температуры воздуха и режима осадков, которые могут иметь серьезные последствия как для природы, так и для общества в Таджикистане [12–16]. Основными стихийными бедствиями в этой области, которые уже зарегистрированы в большом количестве в последние десятилетия и демонстрируют общие тенденции к увеличению, являются засухи, наводнения, оползни и лавины. Например, наиболее опасным последствием изменения климата является таяние горных ледников [7]. Следовательно, это окажет глубокое влияние на гидрологию Таджикистана, что в дальнейшем будет отражаться на национальную продовольственную безопасность, производство энергии и экологию и таким образом, требуются подробные оценки текущего и будущих климатических условий региона [17]. Наш результат показал, что годовая температура постоянно увеличивалась за период 1936–2015 годов, и увеличение тренда наблюдалась в минимальной температуре, а общий тренд по максимальной температуре сильно уменьшился. Однако в отчете Азиатского Банка Развития об устойчивости к изменению климата для инвестиций в природные ресурсы прогнозируется, что максимальная и минимальная дневная температура воздуха в Таджикистане может повыситься.

Также прогнозируется, что среднегодовое количество осадков вряд ли изменится, но из-за более высоких средних температур годовое количество осадков, возможно, увеличится, а годовое количество снега, возможно, уменьшится [18]. Результаты нашего анализа показали, что в зимний период тренд температуры увеличился, что подтверждает рост относительной минимальной температуры. По многолетним данным наблюдения можно судить о том, что выпадения осадков, немного зависима от повышения температуры. На равнинных участках территории Таджикистана наблюдается относительный рост выпадения осадков, а по многолетним данным в высокогорной зоне количество осадков уменьшается. Следующее исследование планируется изучить и спрогнозировать потенциальные будущие климатические условия для различных периодов времени и сценариев выбросов парниковых газов с использованием глобальных климатических моделей.

4. Заключение

Подводя итог исследованию, можно сказать, что на юге республики температуры летнего и зимнего периода времени года показывает положительный тренд и температура растёт летом и зимой. На севере и в центральной части республики также положительный тренд лета и зимы. Восточная часть республики, где начинается высотная территория республики, тренд температуры показывает, что летний период времени года становится немного прохладнее, а зимний период показывает положительный фон температуры, т.е. становится теплее. По многолетним данным наблюдения, выпадение осадков зависит от повышения температуры. И если на равнинных участках территории республики просматривается относительный рост выпадения осадков, то количество осадков в высокогорной зоне (восточный Памир) по многолетним данным уменьшается. Это еще больше усугубляется тем фактом, что текущие климатические данные и национальные анализы немногочисленны и сохраняются большие пробелы в знаниях, касающихся изменчивости климата. Данное исследование

показывает ярко выраженные климатические колебания в Таджикистане: изменения температуры воздуха и осадков, тем самым формируя основу для будущего планирова-

ния национальных мероприятий по смягчению последствий и адаптации к изменению климата.

Список литературы

1. Каюмов А., Салимов Т. Изменения климата и водные ресурсы Таджикистана. Душанбе: Ирфон, 2013. 83 с.

2. Crosa G., Froebrich J., Nikolayenko V., Stefani F., Galli P., Calamari D. Spatial and seasonal variations in the water quality of the Amu Darya River (Central Asia). *Water Research*. 2006. Vol. 40. pp. 2237-2245. DOI: 10.1016/j.watres.2006.04.004.

3. Xu M., Kang S., Wu H., Yuan X. Detection of spatio-temporal variability of air temperature and precipitation based on long-term meteorological station observations over Tianshan Mountains, Central Asia. *Atmospheric research*. 2018. Vol. 203. pp. 141-163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.12.007>.

4. Xu Z., Gong T., Li J. Decadal trend of climate in the Tibetan Plateau—regional temperature and precipitation. *Hydrological Processes: An International Journal*. 2008. Vol. 22. pp. 3056-3065. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.6892>.

5. Sorg A., Bolch T., Stoffel M., Solomina O., Beniston M. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*. 2012. Vol. 2. P. 725. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate1592>.

6. Chen Y., Pang Z., Hao X., Xu C., Chen Y. Periodic changes of stream flow in the last 40 years in Tarim River Basin, Xinjiang, China. *Hydrological processes*. 2008. Vol. 22. pp. 4214-4221. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7024>.

7. Каюмов А., Новиков В. Третье национальное сообщение Республики Таджикистан в соответствии с Рамочной конвенцией ООН по изменению климата. Правительство Республики Таджикистан, Государственное управление по гидрометеорологии Комитета по охране окружающей среды при Правительстве Республики Таджикистан: Душанбе. 2014. 167с.

References

1. Kayumov A., Salimov T. *Izmeneniya klimata i vodnyye resursy Tadjhikistana* [Climate change and water resources of Tajikistan]. Dushanbe, Irfon, 2013. 83 p. (In Russian)

2. Crosa G., Froebrich J., Nikolayenko V., Stefani F., Galli P., Calamari D. Spatial and seasonal variations in the water quality of the Amu Darya River (Central Asia). *Water Research*, 2006, Vol. 40, pp. 2237-2245. DOI: 10.1016/j.watres.2006.04.004.

3. Xu M., Kang S., Wu H., Yuan X. Detection of spatio-temporal variability of air temperature and precipitation based on long-term meteorological station observations over Tianshan Mountains, Central Asia. *Atmospheric research*, 2018, Vol. 203, pp. 141-163. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.12.007>.

4. Xu Z., Gong T., Li J. Decadal trend of climate in the Tibetan Plateau—regional temperature and precipitation. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2008, Vol. 22, pp. 3056-3065. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.6892>.

5. Sorg A., Bolch T., Stoffel M., Solomina O., Beniston M. Climate change impacts on glaciers and runoff in Tien Shan (Central Asia). *Nature Climate Change*, 2012, Vol. 2, pp. 725. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate1592>.

6. Chen Y., Pang Z., Hao X., Xu C., Chen Y. Periodic changes of stream flow in the last 40 years in Tarim River Basin, Xinjiang, China. *Hydrological processes*, 2008, Vol. 22, pp. 4214-4221. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.7024>.

7. Kayumov A., Novikov V. *Tretye natsionalnoe soobshchenie Respubliki Tadjhikistan v sootvetstvii s Ramochnoy konventsiey OON po izmeneniyu klimata* [Third national communication of the Republic of Tajikistan in accordance with the UN Framework Convention on Climate Change.]. Government of the

8. Сабуриён М. Природные условия и особенности восточного Таджикистана (Памир) // Вестник педагогического университета. Естественные науки. 2019. №3-4. С.79-84.

9. Рауфов Р., Давлятов Р.Р. Влияние изменения климата на состояние ледников и режим речного стока Таджикистана // Кисшаварз. 2015. №1. С. 57-59.

10. Усмонов М.Г. Экологическая обстановка Республики Таджикистан: выпускная бакалаврская работа по направлению подготовки: 05.03. 06 - Экология и природопользование. 2020.

11. Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe Version 4. available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>). 2008. Vol. 15. pp. 25-54.

12. Fay M, Block RI, Ebinger J. Adapting to Climate Change in Eastern Europe and Central Asia. World Bank Group, Vol. 52862. 2010. P.180. URL: <http://hdl.handle.net/10986/2407>.

13. Lutz A.F., Immerzeel W.W., Gobiet A., Pellicciotti F., Bierkens M.F. Comparison of climate change signals in CMIP3 and CMIP5 multi-model ensembles and implications for Central Asian glaciers. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2013. Vol. 17. pp. 3661-3677. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-17-3661-2013>, 2013.

14. Christmann S., Aw-Hassan A.A. A participatory method to enhance the collective ability to adapt to rapid glacier loss: The case of mountain communities in Tajikistan. *Climatic Change*. 2015. Vol. 133. pp. 267-282. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1468-1>.

15. Gulakhmadov A., Chen X., Gulahmadov N., Liu T., Anjum M.N., Rizwan M. Simulation of the Potential Impacts of Projected Climate Change on Streamflow in the Vakhsh River Basin in Central Asia under CMIP5 RCP Scenarios. *Water*. 2020. Vol. 12. P. 1426. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12051426>.

16. Gulahmadov N., Chen Y., Gulakhmadov A., Rakhimova M., Gulakhmadov, M. Quantifying the Relative

Republic of Tajikistan, State Department for Hydrometeorology of the Committee for Environmental Protection under the Government of the Republic of Tajikistan, Dushanbe, 2014. 167p. (In Russian).

8. Saburiyon M. *Prirodnye usloviya i osobennosti vostochnogo Tadjhikistana (Pamir)* [Natural conditions and features of eastern Tajikistan (Pamir)]. *Vestnik pedagogicheskogo universiteta, Yestestvennyye nauki*, 2019, No.3-4, pp.79-84. (In Russian).

9. Raufov R., Davlyatov R.R. *Vliyanie izmeneniya klimata na sostoyanie lednikov i rezhim rechnogo stoka Tadjhikistana* [The impact of climate change on the state of glaciers and the regime of river flow in Tajikistan]. *Kishovarz*, 2015, No.1, pp. 57-59. (In Russian).

10. Usmonov M.G. *Ekologicheskaya obstanovka Respubliki Tadjhikistan* [Ecological situation of the Republic of Tajikistan]. *Ekologicheskaya obstanovka Respubliki Tadjhikistan: vypusknaya bakalavrskaya rabota po napravleniyu podgotovki: 05.03. 06-Ekologiya i prirodopolzovaniye*. 2020. (In Russian).

11. Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E. Hole-filled SRTM for the globe Version 4. available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>). 2008. Vol. 15. pp. 25-54.

12. Fay M, Block RI, Ebinger J. Adapting to Climate Change in Eastern Europe and Central Asia. World Bank Group, 2010, Vol. 52862. P.180. URL: <http://hdl.handle.net/10986/2407>.

13. Lutz A.F., Immerzeel W.W., Gobiet A., Pellicciotti F., Bierkens M.F. Comparison of climate change signals in CMIP3 and CMIP5 multi-model ensembles and implications for Central Asian glaciers. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, Vol. 17, pp. 3661-3677. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-17-3661-2013>, 2013.

14. Christmann S., Aw-Hassan A.A. A participatory method to enhance the collective ability to adapt to rapid glacier loss: The case of mountain communities in Tajikistan. *Climatic Change*, 2015, Vol. 133, pp. 267-282. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1468-1>.

Contribution of Climate Change and Anthropogenic Activities on Runoff Variations in the Central Part of Tajikistan in Central Asia. *Land*. 2021. Vol. 10. P. 525. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10050525>.

17. Punkari M., Droogers P., Immerzeel W., Korhonen N., Lutz A., Venäläinen A. Climate change and sustainable water management in Central Asia. Asian Development Bank. 2014. P.27.

18. Government of Tajikistan. Climate Resiliency for Natural Resources Investments. TA 7599-TAJ. Dushanbe, Asian Development Bank. 2011. P. 158.

15. Gulakhmadov A., Chen X., Gulakhmadov N., Liu T., Anjum M.N., Rizwan M. Simulation of the Potential Impacts of Projected Climate Change on Streamflow in the Vakhsh River Basin in Central Asia under CMIP5 RCP Scenarios. *Water*, 2020, Vol. 12, pp. 1426. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12051426>.

16. Gulakhmadov N., Chen Y., Gulakhmadov A., Rakhimova M., Gulakhmadov, M. Quantifying the Relative Contribution of Climate Change and Anthropogenic Activities on Runoff Variations in the Central Part of Tajikistan in Central Asia. *Land*, 2021, Vol. 10, pp. 525. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10050525>.

17. Punkari M., Droogers P., Immerzeel W., Korhonen N., Lutz A., Venäläinen A. Climate change and sustainable water management in Central Asia. Dushanbe, Asian Development Bank, 2014. P.27.

18. Government of Tajikistan. Climate Resiliency for Natural Resources Investments. TA 7599-TAJ. Dushanbe, Asian Development Bank, 2011. P. 158.

Сетевое издание
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Брянского государственного университета
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Учредитель и издатель:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского».

**Свидетельство о регистрации средства массовой информации
выдано Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
Эл № ФС77-62798 от 18 августа 2015 г.**

Главный редактор сетевого издания:

доктор технических наук, профессор
А.В. Лагереv

Адрес учредителя:

ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет
имени академика И.Г. Петровского»
241036, Россия, Брянск, ул. Бежицкая, д. 14

Адрес редакции и издателя:

РИСО ФГБОУ ВО «Брянский государственный университет
имени академика И.Г. Петровского»
241036, Россия, Брянск, ул. Бежицкая, д. 20

Дата размещения сетевого издания в сети Интернет
на официальном сайте <http://www.ntv-brgu.ru> 25.03.2022 г.