



# *Научно-технический вестник*

БРЯНСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

*Nauchno-Tekhnicheskiiy Vestnik  
Bryanskogo Gosudarstvennogo  
Universiteta*

Б Р Я Н С К

---

2021(1)

ISSN 2413-9920

**Научно-технический  
ВЕСТНИК  
Брянского  
государственного  
университета**

**№ 1  
2021**

**Технические науки**

**Nauchno-tekhnicheskij**  
**VESTNIK**  
**Bryanskogo**  
**gosudarstvennogo**  
**universiteta**

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

**№ 1**  
**2021**

**Engineering Science**

ББК 74.580.4

Н-34

Научно-технический вестник Брянского государственного университета. № 1 (2021). Брянск: РИСО БГУ, 2021. – Точка доступа: <http://ntv-brgu.ru>  
Размещено на официальном сайте журнала: 25.03.2021

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

*И.А. Лагереv* – 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. Polyandin* - 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, 2021  
© 2021 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: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-09-29

Результаты научных исследований Брянского государственного университета в сфере мобильных транспортно-перегрузочных канатных систем и комплексов ..... 9

Воскресенский Г.Г., Клигунов Е.С., Сверкунова А.А. (Хабаровск, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-30-37

Исследование переходных процессов движения ножа виброскалывателя уплотненного снега ..... 30

Грушецкий С.М., Евтюков С.А., Ретин С.В., Кузнецов А.А.

(Санкт-Петербург, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-38-52

Определение технической и эксплуатационной производительностей дорожных машин на основе анализа объемов работ ..... 38

Панфилов А.В., Короткий А.А., Иванов Б.Ф., Панфилова Э.А.

(Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-53-65

О критериях и нормах браковки канатов пассажирских канатных дорог ..... 53

Таричко В.И., Перминова Д.И. (Брянск, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-66-72

Основные результаты разработки трансмиссии перспективного шасси для размещения мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса ..... 66

Таричко В.И., Шалупина П.И. (Брянск, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-73-81

Моделирование нагруженности полуприцепа мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса ..... 73

Тиллов К.З., Кромский Е.И., Кондаков С.В. (Челябинск, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-82-89

Выбор рациональных параметров конусного раскатчика для глубокого уплотнения оснований дорог ..... 82

Шишкин Е.А., Иванченко С.Н., Смоляков А.А. (Хабаровск, Российская Федерация)

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-90-95

Упругое последствие в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси ..... 90

## Технология машиностроения

*Романов И.В., Задорожний Р.Н. (Москва, Российская Федерация)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-96-104*

Выбор режимов электроискровой обработки для электродов из спеченной  
бронзы ..... 96

## 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: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-09-29

Results of scientific research of Bryansk State University in the sphere of mobile transportation and handling rope systems and ropeways ..... 9

*Voskresenskiy G.G., Kligunov E.S., Sverkunova A.A. (Khabarovsk, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-30-37

Investigation of transient processes of blade movement of compacted snow vibrocleaver ..... 30

*Grushetskiy S.M., Evtyukov S.A., Repin S.V., Kuznecov A.A.*

*(Saint-Petersburg, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-38-52

Determination of technical and operating performance of road machines based on analysis of the scope of work ..... 38

*Panfilov A.V., Korotkiy A.A., Ivanov B.F., Panfilova E.A. (Rostov-on-Don, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-53-65

About criteria and standards for discharge of ropes of passenger ropeways ..... 53

*Tarichko V.I., Perminova D.I. (Bryansk, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-66-72

The main results of the development of the transmission a promising chassis for the placement of a mobile transport and overloading rope complex ..... 66

*Tarichko V.I., Shalupina P.I. (Bryansk, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-73-81

Load simulation of a semi-trailer of the mobile transport and overloading rope complex.. 73

*Tilloev K.Z., Kromskiy E.I., Kondakov S.V. (Chelyabinsk, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-82-89

Selection of rational parameters of the cone roller for deep compaction of road bases .... 82

*Shishkin E.A., Ivanchenko S.N., Smolyakov A.A. (Khabarovsk, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-90-95

Elastic aftereffect in the process of asphalt concrete mixture compaction ..... 90



**Engineering technology**

*Romanov I.V., Zadorozhny R.N. (Moscow, Russian Federation)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-96-104*

Selection of electric spark processing modes for electrodes from sintered bronze ..... 96

УДК (UDC) 608.4

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

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

Степченко Т.А., Бабич О.В.  
Stepchenko T.A., Babich O.V.Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)  
Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** Представлены результаты научно-исследовательской деятельности ученых Брянского государственного университета имени академика И.Г. Петровского в области разработки перспективных отечественных образцов конструкций мобильных транспортно-перегрузочных канатных систем и дорог на базе самоходных колесных шасси высокой грузоподъемности и проходимости и создания научно обоснованных методов их проектирования и компьютерного моделирования рабочих процессов при эксплуатации. Дано описание и анализ эффективности новых технических решений мобильных пассажирских и грузовых подвесных канатных дорог.

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

**Дата принятия к публикации:** 28.01.2021  
**Дата публикации:** 25.03.2021

**Сведения об авторах:**

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

**Бабич Оксана Викторовна** – доктор экономических наук, доцент, директор НИИ фундаментальных и прикладных исследований ФГБОУ ВПО «Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского»,  
e-mail: babichoksana221@mail.ru.  
ORCID: 0000-0003-1954-1475

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

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

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

**Authors' information:**

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

**Oksana V. Babich** - Doctor of Economical Sciences, Assistant Professor, Director of Research Institute of Fundamental and Applied Research, Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University,  
e-mail: babichoksana221@mail.ru.  
ORCID: 0000-0003-1954-1475

**1. Введение**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

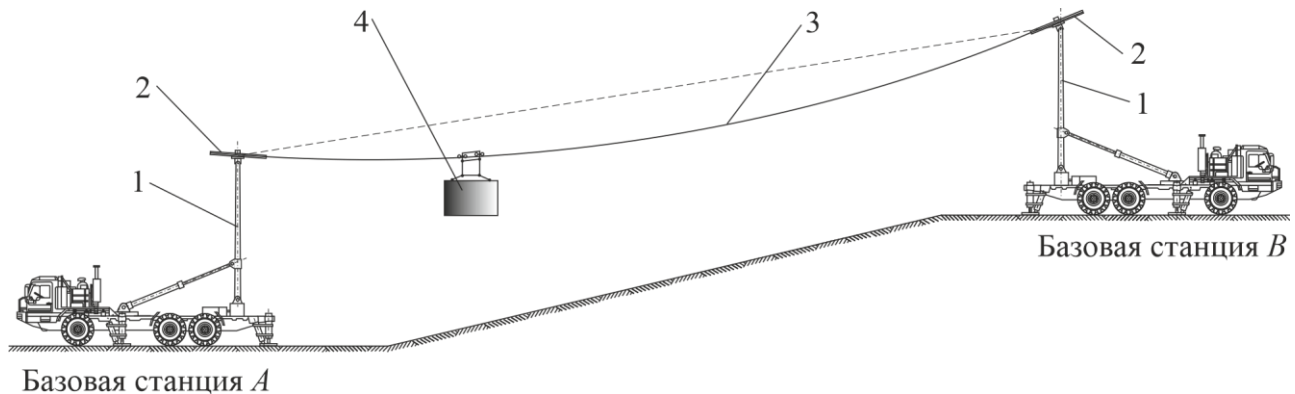


Рис. 1. Схема мобильной канатной дороги [10]: 1 – концевая опора; 2 – канатный шкив; 3 – несущий канат; 4 – транспортируемый груз на подвеске

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

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

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

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

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

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

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

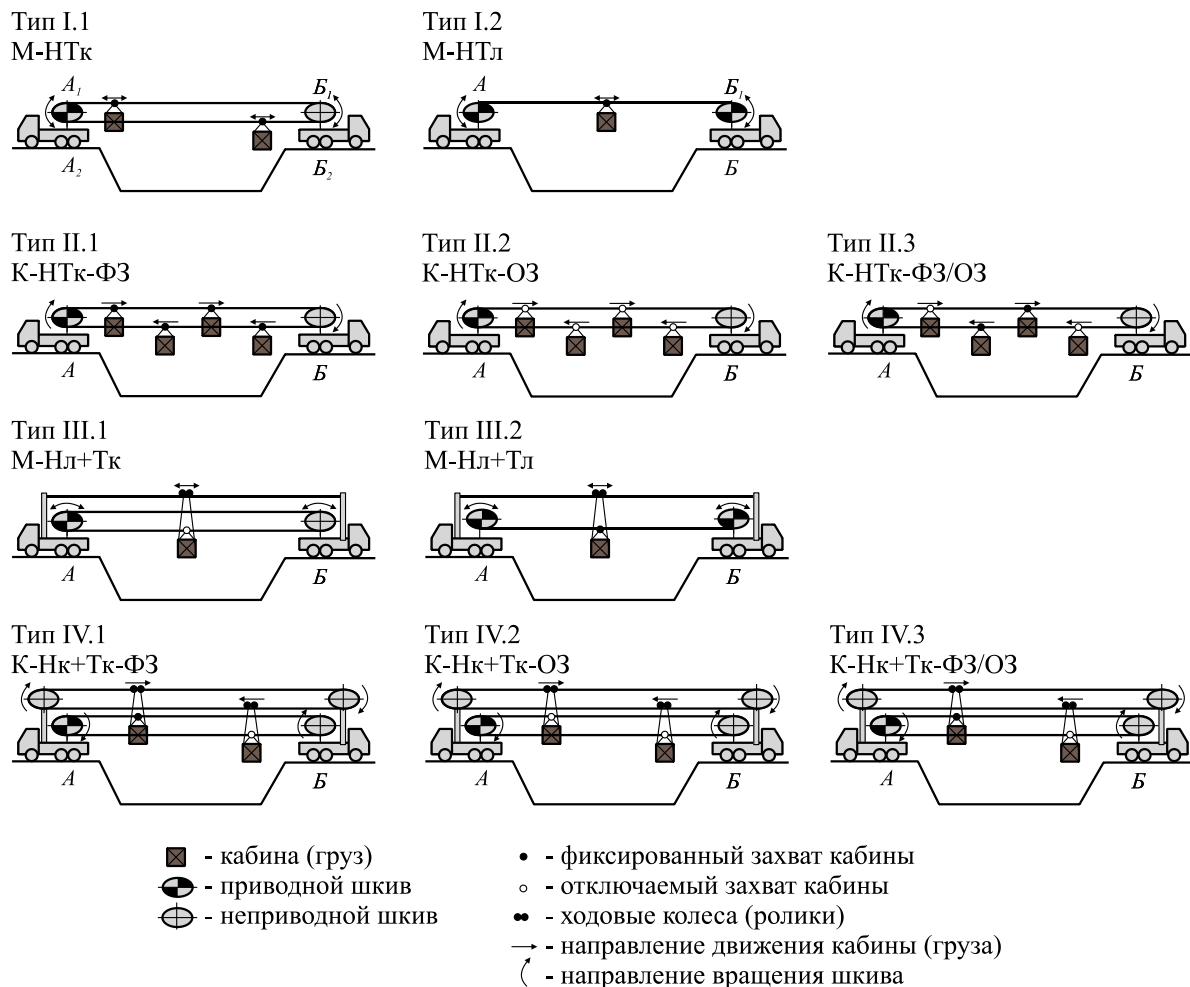


Рис. 2. Альтернативные варианты конструктивного исполнения мобильных канатных дорог [20]

### 3. Разработка перспективных конструкций мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов

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

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

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

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

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

- длина концевой опоры.

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

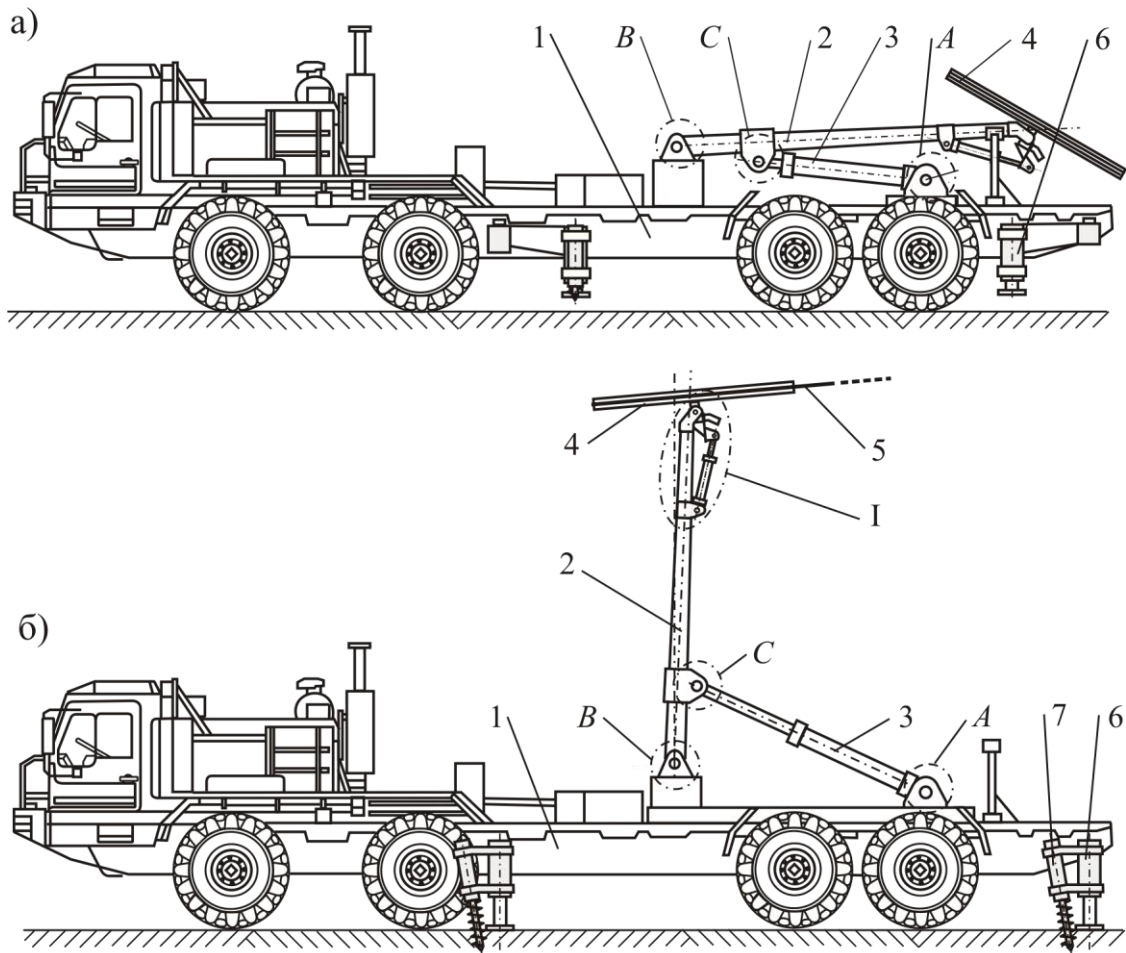


Рис. 3. Общий вид концевой базовой станции (вид сбоку) с центральным расположением опоры при опирании на несущую раму шасси [10, 11]: а - транспортное положение концевой опоры; б - рабочее положение концевой опоры (1 – несущая рама базового шасси; 2 – концевая опора; 3 – подъемный гидроцилиндр; 4 – канатный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

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

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

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

#### 4. Разработка общих вопросов проектирования канатных комплексов

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

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

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

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

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



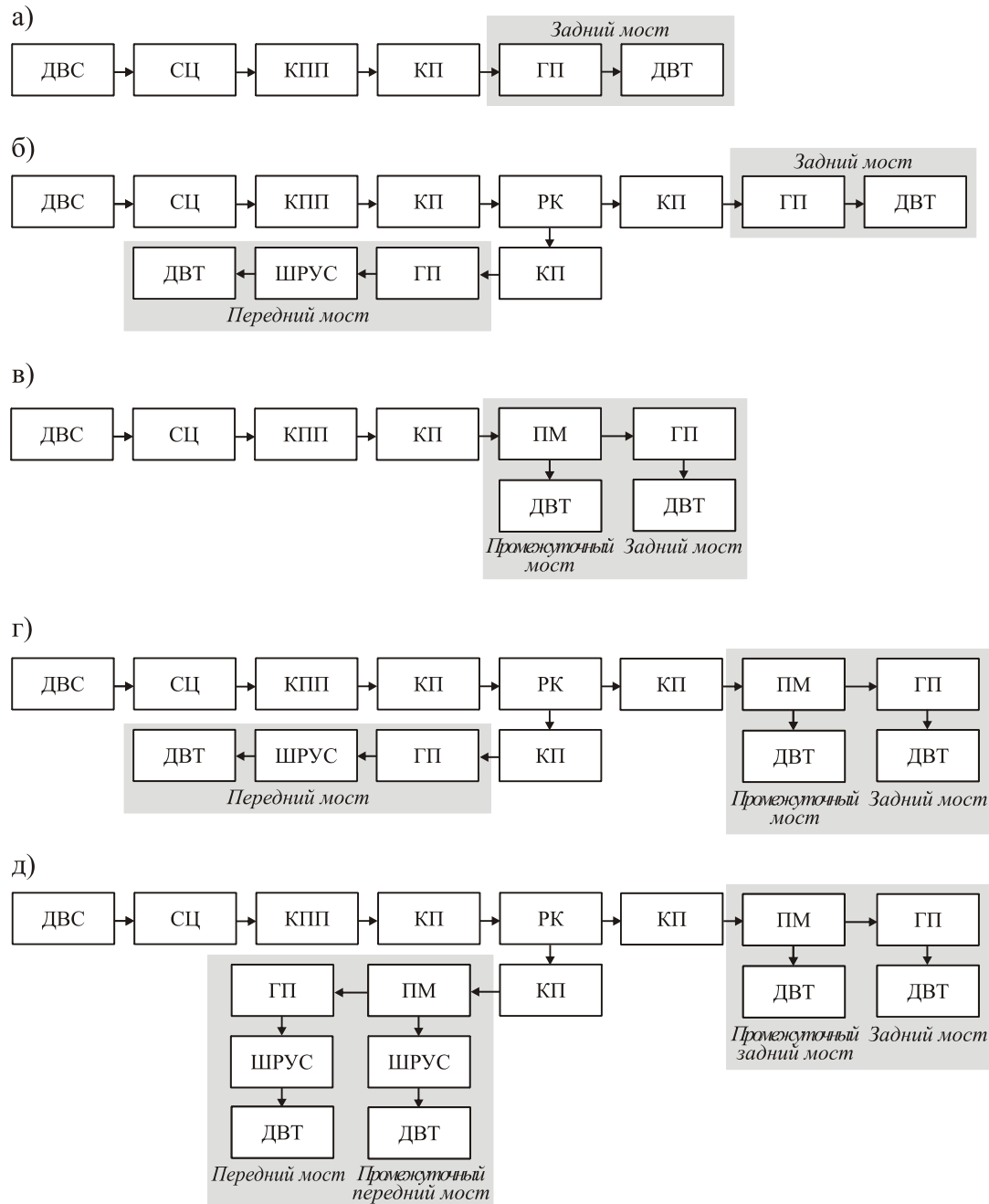


Рис. 4. Структурные схемы механической трансмиссии базовой станции мобильной канатной дороги на колесном шасси [32]: а – шасси 4x2; б – шасси 4x4; в – шасси 6x4; г – шасси 6x6; д – шасси 8x8 (ДВС – двигатель внутреннего сгорания; СЦ – сцепление; КПП – коробка переключения передач; РК – раздаточная коробка; КП – карданная передача; ГП – главная передача; ШРУС – шарнир равных угловых скоростей; ПМ – передача промежуточного моста; ДВТ – движитель)

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

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

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

### 5. Анализ безопасности и надежности эксплуатации канатных комплексов

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

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

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

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

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

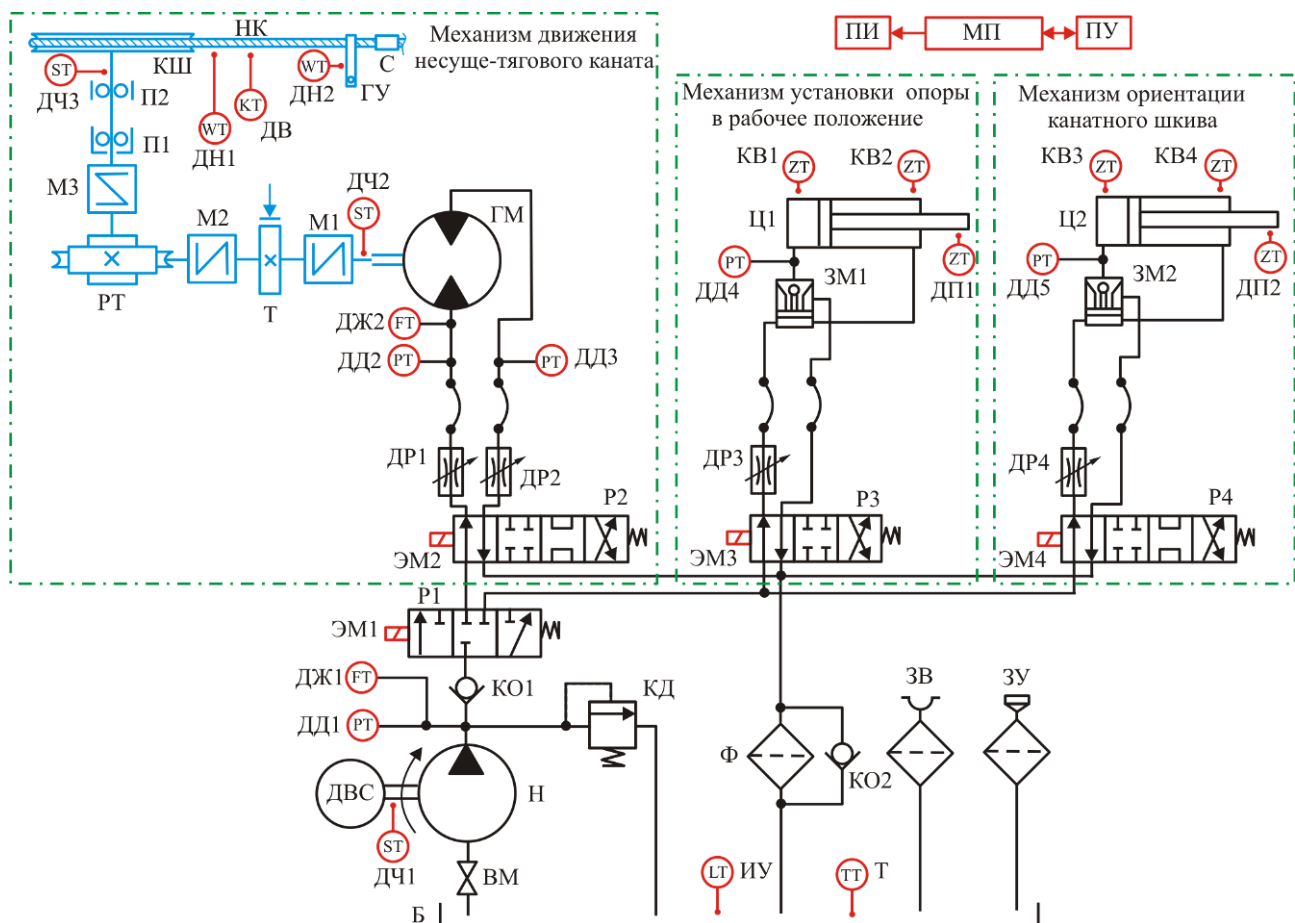


Рис. 5. Обобщенная структурная схема канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса [41]

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 7. Заключение

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

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

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

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

## Список литературы

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

## References

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

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

3. Степченко Т.А., Бабич О.В. Результаты научных исследований Брянского государственного университета в 2019 году в сфере транспортно-логистических технологий и машин для урбанизированной среды // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. № 1. С. 120-135. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-120-135.

4. Короткий А.А., Лагереv А.В., Месхи Б.Ч., Лагереv И.А., Панфилов А.В., Таричко В.И. Транспортно-логистические технологии и машины для цифровой урбанизированной среды. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2019. – 268 с. DOI: 10.5281/zenodo.3551132.

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

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

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

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

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

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

3. Stepchenko T.A., Babich O.V. The results of scientific research of the Bryansk State University in 2019 in the field of transport and logistics technologies and machines for the urban environment. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.1, pp. 120-135. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-120-135. (In Russian)

4. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V., Tarichko V.I. *Transportno-logisticheskie tekhnologii i mashiny dlya tsifrovoy urbanizirovannoy sredy* [Transport and logistics technologies and machines for the digital urban environment]. *Rostov-on-Don, Don State Technical University*, 2019. 268 p. DOI: 10.5281/zenodo.3551132. (In Russian)

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

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

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

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

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

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

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

13. Пат. 165312 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> B66C 23/64. Выносная опора подъемно-транспортной машины / Лагерев И.А., Ковальский В.Ф., Толкачев Е.Н., Шатунова Е.А., Лагерев А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «БГУ им. ак. И.Г. Петровского». – №2016116467; заявл. 26.04.16; опубл. 10.10.2016, Бюл. 28.

14. Пат. 186456 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> B66C 23/78. Выносная опора подъемно-транспортной машины / Лагерев А.В., Лагерев И.А., Остроухов И.О.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «БГУ им. ак. И.Г. Петровского». – №2018136727; заявл. 17.10.18; опубл. 21.01.2019, Бюл. 3.

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

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

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

10. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Konstruksii i osnovy proektirovaniya mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Structures and design fundamentals of mobile transport and transshipment rope complexes]. Bryansk, RISO BGU, 2020. 207 p. (In Russian)

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

31. Таричко В.И., 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

and reloading rope complex. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.3, pp. 388-403. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-388-403 (In Russian)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

46. Лагереv И.А., Таричко В.И., Лагереv А.В. Формирование стратегии восстановления канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса в процессе эксплуатации // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 276-293. DOI:10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293.

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

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

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

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

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

40. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V. *Razvitie transportnoy infrastruktury krupnykh gorodov i territoriy na osnove tekhnologii kanatnogo metro* [The development of transport infrastructure of large cities and territories on the basis of technology of passenger ropeways]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2017. 344 p. DOI: 10.5281/zenodo.1311913 (In Russian)

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

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

48. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Современная теория манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Исследование рабочих процессов и проектирование элементов гидропривода. Брянск: РИО БГУ, 2019. 201 с. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3268490>.
49. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Моделирование режимов работы гидроприводов с частотно-дрессельным регулированием мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С. 462-480. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-462-480.
50. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Работа гидроприводов с частотно-дрессельным регулированием мобильных канатных комплексов при последовательной установке дресселей // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №1. С. 73-92. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-01-73-92.
51. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Modeling of hydrodynamic and kinematic processes during the operation of a mobile cargo rope complex // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol.1753. 012022. DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012022.
52. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Моделирование гидродинамических и кинематических процессов при работе мобильного грузового комплекса // Сб. мат. VII Междунар. научно-практ. конф. «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2020». С.-Пб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. С. 349-353.
53. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Моделирование рабочих процессов в дрессельно-регулируемом гидроприводе манипуляционных систем мобильных машин при раздельном движении звеньев // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2018. №4. С. 355-379. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2018-04-04-355-379>.
54. Дукельский А.И. Подвесные канат-54817-9\_86.
43. Lagereva E.A., Lagerev A.V., Lagerev I.A. Probabilistic estimation of reliability of the hydraulic drive of crane-manipulators simulation-based flow of element failures. *Pryvody i komponenty mashin*, 2012, No.2-3, pp. 2-5. (In Russian)
44. GOST R 54124-2010 Safety of machinery and equipment. Risk assessment. Moscow, Standartinform, 2015. (In Russian)
45. Lagerev A.V., Lagereva E.A. Optimal management of technical risk the design of the hydraulic lifting machines drive. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2015, Vol.1, No.3, pp. 60-66. (In Russian)
46. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Lagerev A.V. Formation of the strategy for restoring the rope system of the mobile transport and reloading rope complex during operation. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 276-293. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293 (In Russian)
47. Tarichko V.I., Chernykh A.A. Remote diagnostics of the ropeway transport system using neural networks. *Sbornik materialov Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. «Energoresursosberegayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoy i stroitelnoy otraslyakh»*, Belgorod, BGTU im. V.G. Shukhova, 2020, pp. 381-384. (In Russian)
48. Lagerev A.V., Lagerev I.A. *Sovremennaya teoriya manipulatsionnykh sistem mobilnykh mnogotselovykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov. Issledovanie rabochikh protsessov i proektirovanie elementov gidroprivoda* [Modern theory of manipulation systems of mobile multi-purpose transport and technological machines and complexes. Research of working processes and design of hydraulic drive elements]. Bryansk, RISO BGU, 2019. 201 p. DOI: 10.5281/zenodo.3268490 (In Russian)
49. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Modeling operation modes of hydraulic drives with frequency-throttle regulation of mobile transport and overloading ropes complexes. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.4, pp. 462-480. DOI:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

УДК (UDC) 625.768

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ  
НОЖА ВИБРОСКАЛЫВАТЕЛЯ УПЛОТНЕННОГО СНЕГАINVESTIGATION OF TRANSIENT PROCESSES OF BLADE MOVEMENT OF  
COMPACTED SNOW VIBROCLEAVERВоскресенский Г.Г., Клигунов Е.С., Сверкунова А.А.  
Voskresenskiy G.G., Kligunov E.S., Sverkunova A.A.Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Россия)  
Pacific national university (Khabarovsk, Russian Federation)

**Аннотация.** В статье рассмотрен процесс обратного движения ножа виброскалывателя уплотненного снега при удалении уплотненного снега с поверхности автомобильных дорог, внутри дворовых территорий, автобусных остановок, парковок автомобилей. Особенностью процесса разрушения уплотненного снега в режиме виброрезания является прерывистый контакт ножа с разрушаемой средой. Условием установившегося режима виброрезания является критерий выхода ножа виброскалывателя из контакта с разрушаемой средой. Целью исследования является установление времени, при котором прерывается контакт ножа с уплотненным снегом. Полученные результаты расчетов дают возможность установить значения, при которых возможен режим виброрезания и выбрать параметры гидроаккумулятора, обеспечивающего перемещение ножа виброскалывателя уплотненного снега. В результате численных расчетов установлено влияние диаметра гидротолкателя на изменение давления в гидроневмоаккумуляторе, рабочего объема и объема газовой камеры на основе исследования динамических процессов идеального газа в оболочке гидроневмоаккумулятора.

**Ключевые слова:** уплотненный снег, виброрезание, виброскалыватель, гидропривод, переходный процесс.

**Дата принятия к публикации:** 17.02.2021  
**Дата публикации:** 25.03.2021

**Сведения об авторах:**

**Воскресенский Геннадий Гаврилович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»,  
e-mail: 004179@pnu.edu.ru.

ORCID: 0000-0002-7951-6987

**Клигунов Евгений Сергеевич** – старший преподаватель кафедры «Транспортно-технологические системы в строительстве и горном деле», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», e-mail: 005196@pnu.edu.ru.

ORCID: 0000-0002-1874-7829

**Abstract.** The lack of the necessary amount of equipment for winter maintenance, significant precipitation in the form of snow, lead to a decrease in the efficiency of roads. Inside, courtyards and sidewalks are also covered with a layer of compacted snow due to untimely snow removal. Mechanic method of breaking compacted snow is currently insufficiently studied and so far there is no effective equipment to combat snow and ice formations. A peculiarity of the process of compacted snow destruction in the mode of vibration cutting is intermittent contact of the knife with the destroyed medium. Condition of the set mode of vibrocutting is the criterion of an exit of a blade of a vibroclevener from contact with the destroyed environment. The aim of the study is to establish the time at which the knife comes into contact with compacted snow. The obtained results of the calculations make it possible to set the values at which the mode of "vibration cutting" is set and to select parameters of the hydraulic accumulator, which ensures the movement of the blade of the vibroclevener of the compacted snow.

**Keywords:** compacted snow, vibration cutting, vibroclevener, hydraulic drive, transient process.

**Date of acceptance for publication:** 17.02.2021  
**Date of publication:** 25.03.2021

**Authors' information:**

**Gennadiy G. Voskresenskiy** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department "Transport and technological machines in construction and mining" at Pacific National University,  
e-mail: 004179@pnu.edu.ru.

ORCID: 0000-0002-7951-6987

**Evgeniy S. Kligunov** – senior lecturer of Department of "Transport and technological machines in construction and mining" at Pacific National University,  
e-mail: 005196@pnu.edu.ru.

ORCID: 0000-0002-1874-7829

Сверкунова Анастасия Александровна – старший преподаватель кафедры «Иностранные языки», ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», e-mail: 000664@pnu.edu.ru.

Anastasia A. Sverkunova – senior lecturer of Department “Foreign languages” at Pacific National University, e-mail: 000664@pnu.edu.ru.

## 1. Введение

Транспортная система Российской Федерации включает сеть автомобильных и железных дорог, речного и морского транспорта. Автомобильным транспортом перевозится более 55% грузов и 60% пассажиров. Развитие протяженности дорог и инфраструктуры определено программными документами, по которым планируется увеличение протяженности автомобильных дорог к 2030 году в 1,5 раза с 1,508 млн. км до 2,25 млн. км [1].

Эффективность эксплуатации дорог зависит от качества их летнего и зимнего содержания. Летнее содержание в настоящее время обеспечено разнообразной и эффективной техникой [2].

Технологии зимнего содержания автомобильных дорог предусматривают очистку дорог от снега, предотвращают зимнюю скользкость и обеспечивают коэффициент сцепления шин автомобилей с поверхностью движения.

Эти мероприятия приобретают особое значение для городских автомобильных дорог, для которых незначительное нарушение требований приводят к существенным экономическим потерям. Следует отметить, что в настоящее время отсутствует высокопроизводительная техника для скалывания уплотненного снега и снежно-ледяных образований с дорожных покрытий.

Работы по очистке дорог от снега в городских условиях должны производиться в кратчайшие сроки (5...6 ч после выпадения осадков), так под воздействием шин автомобилей, передвижения пешеходов, колебаний температуры и влажности снега, его метаморфизма, происходит увеличение сил резания, контактной прочности. Буксование шин ведет к появлению температуры в зоне контакта и появлению обледенения поверхности. Важное значение приобретает процесс разрушения наледей на горных дорогах предприятий горнодобывающей отрасли.

Использование современных химических реагентов ограничено температурным режимом до  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-12^{\circ}\text{C}$  и оказывает отрицательное воздействие на экологию, обувь пешеходов, ведет к простудным заболеваниям и разрушению металлоконструкций автомобилей и мостовых сооружений.

Существующая техника для уборки уплотненного снега на дорожных покрытиях реализует статическое резание с использованием ножей бульдозеров, автогрейдеров, зубьев ковшей экскаватора, при этом должны быть обеспечены значительные удельные давления ножа в зоне контакта со средой и движущие силы резания

Влияние вибраций на снижение сил резания в 3...5 раз по сравнению со статическим резанием было установлено в 1934 году Г.И. Покровским и его сотрудниками и продолжено в работах Е.Г. Коновалова, А.В. Борисенко, В.Н. Баранова, Ю.Е. Захарова, Д. Кумабе [3, 4].

## 2. Материалы и методы

Новое оборудование, созданное по принципу «вибрационное резание» разработано и испытано в Тихоокеанском государственном университете в результате длительных теоретических и опытно-конструкторских исследований [5, 6].

В результате теоретических исследований установлено, что эффективность гидросистемы для осуществления высокочастотных колебаний определяется мощностью гидропривода, средним значения давления за цикл колебаний, быстродействием, частотой и амплитудой колебаний ножа. Использование гидроаккумуляторов дает возможность накапливать потенциальную энергию в период обратного движения ножа. Таким образом, достигается экономичность гидросистемы.

Новое рабочее оборудование является навесным на мобильной базовой машине независимо от ее массы и размеров и включает гидросистему для управления рабочим обо-



рудованием и гидравлическую систему (рис.1), обеспечивающую формирование пе-

риодических колебаний ножа виброскальвателя уплотненного снега и льда.

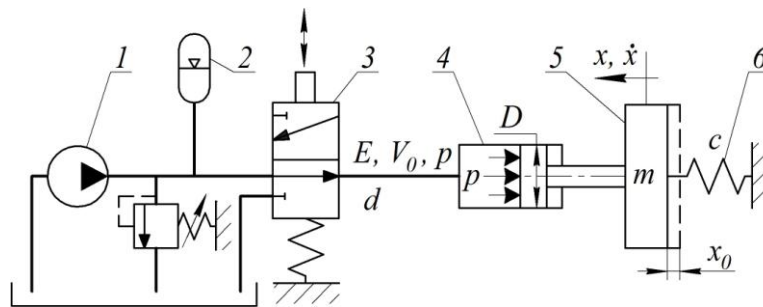


Рис. 1. Гидравлическая схема виброскальвателя уплотненного снега:

1 – гидронасос; 2 – гидропневмоаккумулятор; 3 – гидрораспределитель; 4 - гидротолкатель; 5 – приведенная масса ножа и упругой подвески 6; 7 – клапан предохранительный

Переходный процесс рабочего движения ножа виброскальвателя происходит при открытом положении гидрораспределителя 3 и рабочая жидкость от гидронасоса 1 и гидропневмоаккумулятора 2 поступает к двум гидротолкателям 4, воздействующими с упругой подвеской 6 и ножом. При достижении времени  $T/2$  (полупериода колебаний) происходит закрытие окон гидрораспределителя 3, рабочая жидкость заряжает гидропневмоаккумулятор, а нож начинает обратное движение под действием сил упругости сжатой упругой подвески.

Рациональные параметры гармонических колебаний следует выбирать из условия расчета времени, при котором нож успевает возвратиться в первоначальное положение.

П.А. Семенцовым в соавторстве разработана математическая модель процесса возвратного движения ножа виброскальвателя [7].

Координата режущей кромки ножа составит

$$x_{\Sigma} = x_0 - x + V_m \cdot t, \quad (1)$$

где  $x_0$  - начальная координата положения ножа;  $x$  - текущая координата возвратного движения ножа;  $V_m$  - поступательная скорость движения базовой машины.

Процесс возвратного движения ножа представим в виде:

$$m \cdot \ddot{x} + k \cdot \dot{x} + c \cdot x = c \cdot x_0 - P \cdot F, \quad (2)$$

где  $m$  - приведенная масса штока и ножа виброскальвателя;  $k$  - коэффициент вязкого трения;  $c$  - жесткость пружины;  $F$  - площадь

поршня;  $x_0$  - начальное положение штока;  $P$  - давление в полости гидротолкателя.

Давление перед гидротолкателем с первоначального  $p_0$  резко снижается, а затем по мере возвращения ножа в исходное положение возрастает за счет преодоления сопротивлений движению рабочей жидкости [8, 9]:

$$p = p_0 \cdot e^{-\alpha t} + \left( \lambda \cdot \frac{l}{d} + \xi \right) \cdot \left( \frac{2 \cdot F_T}{f_{mp}} \right)^2 \cdot \rho_{жс} \cdot \dot{x}^2, \quad (3)$$

где  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий интенсивность падения первоначального давления ( $\alpha = 400$  1/с);  $\lambda$  - коэффициент сопротивления движению рабочей жидкости;  $l$ ,  $d$  - длина и диаметр трубопроводов;  $\xi$  - коэффициент местного сопротивления ( $\xi = 10$ );  $F_T$  - площадь гидротолкателя;  $D$  - диаметр гидротолкателя;  $f_{mp}$  - площадь трубопроводов;  $\rho_{жс}$  - плотность рабочей жидкости.

Коэффициент сопротивления движению рабочей жидкости рассчитан по условию [8, 9]

$$\lambda = \frac{75}{Re},$$

где  $Re = v_{pжс} d / \nu$  - число Рейнольдса;  $v_{pжс} = F_T \dot{x}_1 / f_{mp}$  - средняя скорость движения рабочей жидкости;  $\nu$  - вязкость рабочей жидкости при температуре  $+20^{\circ}\text{C}$ .

### 3. Обсуждение результатов

Решение уравнений (2) и (3) выполнено в программе MATLAB с принятыми значениями  $m = 0,003 \text{ кг}\cdot\text{с}^2/\text{см}$ ;  $k = 0,2 \text{ кг}\cdot\text{с}/\text{см}$ ;  $F_T = 1,13 \text{ см}^2$ ;  $f_{mp} = 0,5 \text{ см}^2$ ;  $V_m = 100 \text{ см}/\text{с}$ ;  $c = 91,8 \text{ кг}/\text{см}$ ;  $x_0 = 0,6 \text{ см} \dots 1,6 \text{ см}$ .

В результате численного решения получены графики переходных процессов движения ножа виброскальвателя. Установлено, что в момент открытия окон гидрораспределителя на слив нож достигает значения  $x_0$ , а давление резко снижается со значения  $p_0$  (рис. 2) до значений, определяемых потерями давления на местные сопротивления и по длине трубопроводов.

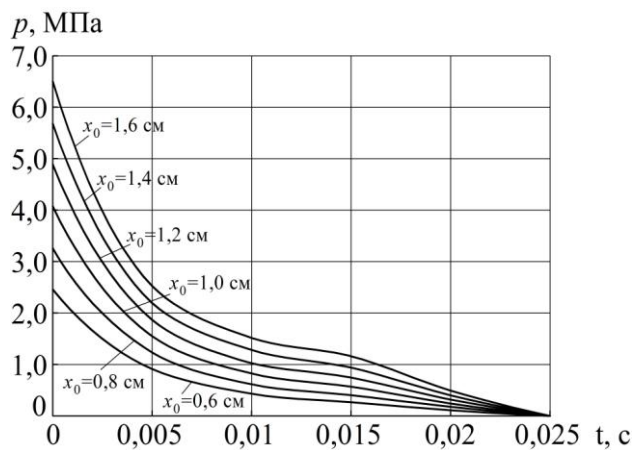


Рис. 2. Переходные процессы изменения давления в трубопроводе

Под действием упругой силы нож начинает возвратное движение (рис. 3). Скорость возвратного движения зависит от величины  $x_0$  и  $p_0$ . В то же время нож виброскальвателя продолжает движение вместе с базовой машиной со скоростью  $V_m$ .

Скорость возвратного движения ножа зависит от  $x_0$  и  $p_0$  (рис. 4).

Условием установившегося режима виброрезания является критерий выхода ножа виброскальвателя из контакта с разрушаемой средой

$$V_{\Sigma} = V_0 - \dot{x} < 0 \quad (4)$$

Установлено, что при скорости базовой машины  $V_m = 1,0 \text{ м}/\text{с}$  (100 см/с) только при

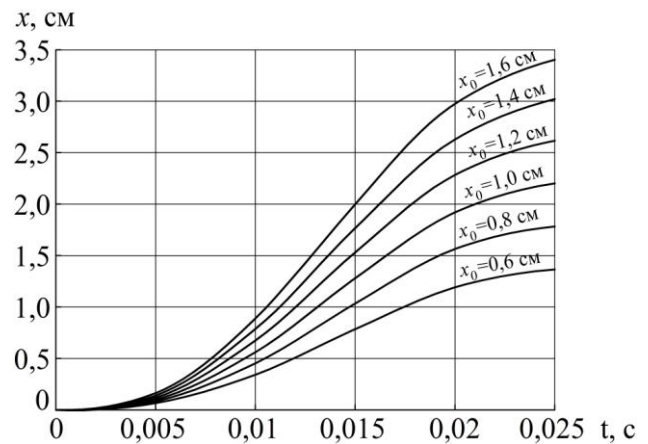


Рис. 3. Переходные процессы возвратного движения ножа виброскальвателя

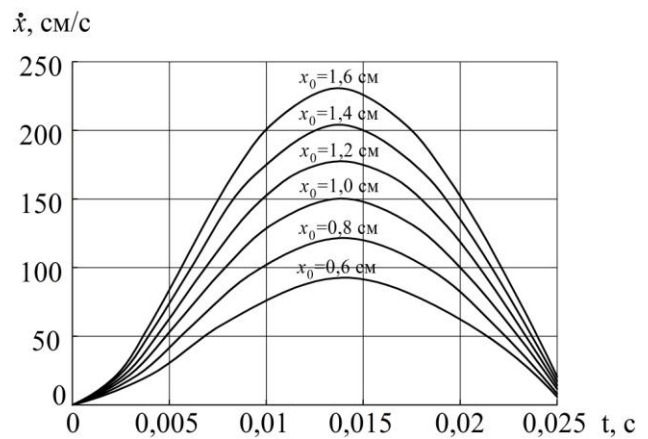
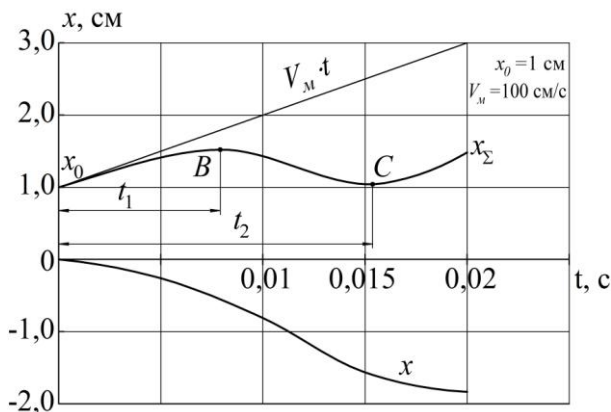


Рис. 4. Переходные процессы скорости возвратного движения ножа виброскальвателя

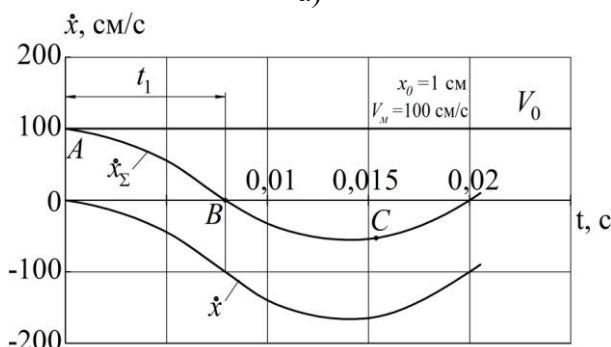
$x_0 > 0,8 \text{ см}$  скорость возвратного движения может обеспечить выход ножа из контакта с разрушаемой средой.

Выбор рациональных параметров гидросистемы и гидроаппаратуры определяется временными характеристиками процесса виброрезания. Критерием эффективности режима разрушения уплотненного снега является условие выхода ножа инструмента из зоны резания, т.е. когда скорость движения ножа виброскальвателя близка к нулю (рис. 5).

Из графиков (рис. 5, а) следует, что в момент достижения координаты ножа  $x_0$ , нож вместе с базовой машиной движется вперед со скоростью  $V_m$ , в то же время нож начинает двигаться в противоположную сторону со скоростью  $\dot{x}$ . В точке В координата ножа достигает наибольшего значения за время  $t_1$ ,



а)



б)

Рис. 5. Движение ножа виброскальвателя:  
 а - перемещение; б) - скорость

а затем происходит снижение значения  $x$  до точки С за время  $t_2$ , а затем скорость движения ножа вперед начинает возрастать.

В ходе расчетов установлено, что время  $t_1$  не зависит от величины  $x_0$  и определяется значениями скорости базовой машины. Время  $t_2$  также зависит от скорости движения базовой машины  $V_m$ . Начальная координата  $x_0$  определяет скорость обратного движения ножа (рис. 6). С увеличением  $x_0$  пропорционально возрастает и максимальная скорость обратного движения ножа. Выход ножа из зоны резания определяется значением  $\Delta x$

$$\Delta x = x_B - x_C. \quad (5)$$

Период колебаний  $T$  может быть установлен как двойная сумма времени  $t_2$ .

Критерием эффективности процесса виброрезания является безразмерный показатель

$$\tau < \frac{V_m \cdot 10^2}{a \cdot \omega} (0,5 \dots 0,6), \quad (6)$$

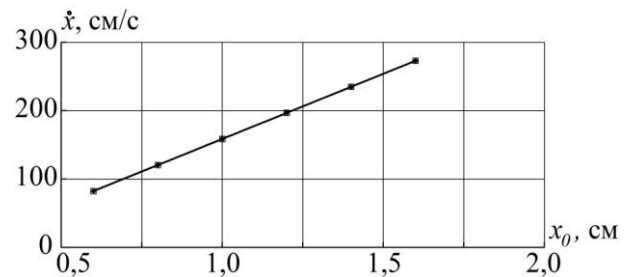


Рис. 6. Влияние начального положения ножа  $x_0$  на максимальную скорость обратного движения ножа

где  $a$  - амплитуда колебаний, см;  $\omega$  - частота колебаний, 1/с;  $V_m$  - скорость движения базовой машины, м/с.

Амплитуда колебаний может быть установлена

$$a > \frac{x_B + x_0}{2}, \quad (7)$$

а частота колебаний

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}. \quad (8)$$

Рабочий объем гидроаккумулятора составит [8]

$$V_a = Q_n \cdot t_2 + \frac{V_0}{E} p, \quad (9)$$

где  $V_0$  - объем нагнетательной магистрали;  $E$  - модуль упругости гидросистемы и гидроаккумулятора;  $Q_n$  - производительность гидронасоса.

С целью исключения прерывистого движения и обеспечения гармонических колебаний в т. С гидрораспределитель 3 должен переключаться в положение «рабочее движение ножа» и обеспечивать ускоренное движение ножа в зону резания.

Мощность гидропривода определяется рабочими нагрузками на ноже виброскальвателя и скоростью рабочего движения ножа, которая должна быть не менее скорости обратного движения

$$N_r = R \cdot \dot{x} \cdot 10^{-3}, \quad (10)$$

где  $R$  - нагрузка на ноже, Н;  $\dot{x}$  - скорость движения ножа, м/с.

В настоящее время отсутствуют результаты исследований о влиянии амплитуды

или частоты колебаний на эффективность разрушения уплотненного снега.

Применение гидроаккумулятора дает возможность создать экономичную гидросистему.

Основные параметры гидропневмоаккумулятора можно определить, рассмотрев уравнение состояния азота в гидропневмоаккумуляторе.

Уравнение состояния идеального газа имеет вид [10]

$$P_0 V_0 = RT, \quad (11)$$

где  $P_0$ ,  $V_0$ ,  $T$  - давление, объем и абсолютная температура газа соответственно;  $R$  - универсальная газовая постоянная.

При допущении, что процессы в гидроаккумуляторе скоротечны, температура неизменна, тогда уравнение (11) выражает изотермический процесс:  $P_0 V_0 = const$ .

Особенность работы гидроимпульсной системы состоит в том, что в период обратного движения ножа за время  $t_2$  заряжает гидроаккумулятор, а рабочий ход обеспечивается подачей гидронасоса и объемом разряжаемого гидроаккумулятора. Давление начала зарядки гидроаккумулятора  $P_0$  определяется усилиями на деформацию упругой подвески ножа и импульсного усилия резания снега

$$P_0 = \frac{cx_0 + P_p(t)}{2F_T}, \quad (12)$$

где  $P_p(t)$  - импульсная сила резания снега, изменяющаяся от нуля до максимальных значений в период времени  $T/2 = T_2$ .

Процесс зарядки гидроаккумулятора можно представить как

$$P_0 V_0 = (P_0 + \Delta p)(V_0 + \Delta V), \quad (13)$$

где  $\Delta p$  и  $\Delta V$  - приращение давления и объема в гидроаккумуляторе.

После преобразования уравнения (13) получим зависимость рабочего объема

$$\Delta V = \frac{\Delta p}{(P_0 + \Delta p)} V_0, \quad (14)$$

где  $V_0$  - начальный объем гидроаккумулятора.

Уравнение расходов в рабочем режиме учитывает объем рабочей жидкости, поступающей от гидронасоса и гидроаккумулятора:

$$\Delta V + Q_n \cdot t_2 = x_0 \cdot 2F_T + \frac{V_1}{E}(P_0 + \Delta p), \quad (15)$$

где  $V_1$  - объем рабочей жидкости в магистрали от насоса до гидротолкателей.

Представим, что  $P_0 + \Delta p = p_n$  и найдем рабочий объем гидропневмоаккумулятора:

$$\Delta V = x_0 \cdot 2F_T + \frac{V_1}{E} p_n - Q_n \cdot t_2. \quad (16)$$

В гидросистеме принят шестеренный гидронасос НШ-10. Рабочий объем  $\Delta V$  рассчитаем для значений  $x_0 = 1,6$  см,  $V_1 = 100$  см<sup>3</sup>,  $E = 5000$  кг/см<sup>2</sup>,  $p_n = 160$  кг/см<sup>2</sup>,  $Q_n = 125$  см<sup>3</sup>/с,  $t_2 = 0,02$  с.

Площадь гидротолкателей учтена для диаметра гидротолкателей  $d = 1,2$  см;  $d = 1,4$  см;  $d = 1,6$  см;  $d = 1,8$  см. С увеличением диаметра гидротолкателя  $d$  возрастает и рабочий объем  $\Delta V$  гидропневмоаккумулятора (рис. 7).

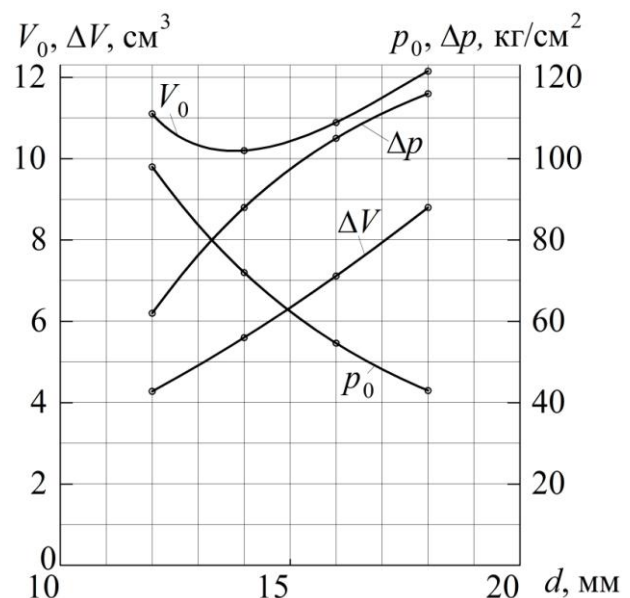


Рис. 7. Влияние диаметра гидротолкателя на рабочий объем гидропневмоаккумулятора и давления  $P_0$  и  $\Delta p$

Начальное давление  $P_0$  определим для тех же численных значений гидросистемы и коэффициента упругости  $c = 91,9$  кг/см под-

вески ножа и максимальных значений силы резания уплотненного снега  $P_p(t)=750$  Н.

Из уравнения (14) найдем значение  $V_0$ :

$$V_0 = \frac{P_n \cdot \Delta V}{\Delta p}. \quad (17)$$

Минимальное значение  $V_0$  соответствуют  $d = 14$  мм.

Рассчитанные значения  $\Delta V$ ,  $V_0$ ,  $\Delta p$  позволяют спроектировать гидропневмоаккумулятор с рациональными параметрами.

#### 4. Заключение

Полученные результаты расчетов дают возможность установить значения, при которых возможен режим виброрезания и выбрать параметры гидроаккумулятора, обеспечивающего перемещение ножа виброскальвателя уплотненного снега до значений  $x_0 > 0,8$  см. Уравнения состояния идеального газа (азота) могут применяться для расчета параметров гидроаккумулятора, работающего в режиме высокочастотных колебаний рабочего инструмента.

Установлено, что критерий эффективности  $\tau$  определяется скоростью базовой ма-

шины  $V_m$ , амплитудой  $a$  и частотой колебаний  $\omega = 2 \cdot \pi / T$ . Увеличение скорости движения базовой машины приводит к росту производительности.

Разработанное оборудование обладает минимальными габаритами и мощностью двигателя внутреннего сгорания и предназначено для механизации ручного труда дворников. По расчетам производительность труда дворника возрастает в 25 раз, а себестоимость работ сокращается в 6 раз.

В дальнейших исследованиях предполагается изготовление виброскальвателя и доводка параметров нового оборудования для очистки тротуаров от снежно-ледяных образований по механизированной технологии. С учетом работы виброскальвателя в условиях низких температур одной из задач является исследование переходных процессов движения ножа при различных температурах окружающего воздуха, а также разработка методики и экспериментальная оценка качества очистки поверхности для различных скоростей движения виброскальвателя, амплитуды и частоты колебаний ножа.

#### Список литературы

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/3/1009>.
2. Коммунальные машины. Конструкция. Расчет. Потребительские свойства: учеб. пособие / Под общ. ред. В.И. Баловнева, С.Н. Иванченко. Хабаровск: Изд-во Тихоокеанского государственного университета, 2019. 384 с.
3. Кумабэ Д. Вибрационное резание. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.
4. Баранов В.Н., Захаров Ю.Е. Электрогидравлические и гидравлические вибрационные механизмы. М.: Машиностроение, 1966. 243 с.
5. Воскресенский Г.Г. Основы механики разрушения уплотненного снега на автомобильных дорогах. Хабаровск: Изд-во Тихо-

#### References

1. *Transportnaya strategiya Rossiyskoy Federatsii do 2030 goda* [Transport strategy of the Russian Federation until 2030] Available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/3/1009/> (In Russian)
3. *Kommunalnye mashiny. Konstruktsiya. Raschet. Potrebitelskie svoystva* [Utility vehicles. Construction. Calculation. Consumer Properties]. Khabarovsk, Pacific national university, 2019. 384 p. (In Russian)
3. Kumabe D. *Vibratsionnoe rezanie* [Vibration cutting]. Moscow, Mashinostroenie, 1985. 424 p. (In Russian)
4. Baranov V.N., Zakharov Yu.E. *Elektrogidravlicheskie i gidravlicheskie vibratsionnye mekhanizmy* [Electrohydraulic and hydraulic vibration mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie, 1966. 243 p. (In Russian)

океанского государственного университета, 2008. 250 с.

6. Воскресенский Г.Г., Клигунов Е.С. Исследование процесса движения малогабаритного виброскальвателя уплотненного снега // Вестник ТОГУ. 2017. №447). С. 67-72.

7. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вуза. М.: Наука, 1968. 939 с.

8. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика. М.: Машиностроение, 1971. 672 с.

9. Чупраков Ю.И. Гидропривод и средства гидроавтоматики. М.: Машиностроение, 1979. 232 с.

10. Семенцов П.А., Воскресенский Г.Г. Разработка математической модели процесса возвратного движения ножа виброскальвателя уплотненного снега // Мат. секционных заседаний 60-й студ. научно-практ. ТОГУ: в 2 т. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2020, Т.2, с. 115-118.

‡  
‡ 5. Voskresenskiy G.G. *Osnovy mekhaniki razrusheniya uplotnennogo snega na avtomobilnykh dorogakh* [Basic mechanics of compacted snow destruction on roads]. Khabarovsk, Pacific national university, 2008. 250 p. (In Russian)

‡ 6. Voskresenskiy G.G., Kligunov E.S. *Issledovanie protsessa dvizheniya malogabaritnogo vibroskalyvatelya uplotnennogo snega* [Investigation of the process of movement of small-barite vibration scraper of compacted snow]. *Vestnik TOGU*, 2017, №4 (47), pp. 67-72. (In Russian)

‡ 7. Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuza* [Handbook of Physics for engineers and university students]. Nauka, 1968. 939 p. (In Russian)

‡ 8. Bashta T.M. *Mashinostroitelnaya gidravlika* [Mechanical Engineering Hydraulics]. Moscow, Mashinostroenie, 1971. 672 p. (In Russian)

‡ 9. Chuprakov U.I. *Gidroprivod i sredstva gidroavtomatiki* [Hydraulic drive and hydraulic automation equipment]. Moscow, Mashinostroenie, 1979. 232 p. (In Russian)

‡ 10. Sementsov P.A., Voskresenskiy G.G. *Razrabotka matematicheskoy modeli protsessa vozvratnogo dvizheniya nozha vibroskalyvatelya uplotnennogo snega* [Development of a mathematical model of the process of the return movement of the knife of the compacted snow shaker]. Khabarovsk, Pacific national university, 2020, pp. 115-118. (In Russian)

УДК (UDC) 625.089.23

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЕЙ ДОРОЖНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА  
ОБЪЁМОВ РАБОТDETERMINATION OF TECHNICAL AND OPERATING PERFORMANCE OF ROAD  
MACHINES BASED ON ANALYSIS OF THE SCOPE OF WORKГрушецкий С.М., Евтюков С.А., Репин С.В., Кузнецов А.А.  
Grushetsky S.M., Evtuykov S.A., Repin S.V., Kuznecov A.A.Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (Санкт-Петербург, Россия)  
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Saint-Petersburg, Russian Federation)

**Аннотация.** Производительность дорожных машин является критерием, который связывает все этапы жизненного цикла дороги и жизненного цикла дорожных машин. Для обеспечения жизненного цикла дорог и жизненного цикла дорожных машин необходимо выполнение, как минимум, трёх условий: выполнение в срок необходимых объёмов дорожных работ; обеспечение технического состояния дорожных машин на уровне, позволяющем выполнять технические задания; качество выполняемых объёмов работ должно соответствовать предъявляемым требованиям. Таким образом, одной из целей проводимой работы является исследование связи между объёмами выполняемых дорожными машинами работ при обеспечении жизненного цикла дорог и этапами жизненного цикла дорожных машин через их производительность. Целью данной статьи является показать, как определялись техническая, эксплуатационная плановая (необходимая) и фактическая производительности дорожных машин при работе на конкретных объектах при проведении эксперимента.

**Ключевые слова:** дорожная машина, жизненный цикл дороги, жизненный цикл дорожной машины, производительность.

**Дата принятия к публикации:** 24.02.2021

**Дата публикации:** 25.03.2021

**Сведения об авторах:**

**Грушецкий Станислав Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры «Наземные транспортно-технологические машины», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, e-mail: grushetsky.stanislav@yandex.ru.

**Евтюков Сергей Аркадьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические машины», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, e-mail: s.a.evt@mail.ru.

**Репин Сергей Васильевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические машины», Санкт-

**Abstract.** Performance of road cars is criterion which connects all stages of life cycle of the road and life cycle of road cars. To ensure the life cycle of roads and the life cycle of road machines, at least three conditions must be fulfilled: the completion of the necessary volumes of pre-construction work on time; Maintenance of road machines at the level enabling them to perform technical tasks; The quality of the scope of work should meet the requirements. Thus, one of the objectives of the work carried out was to study the relationship between the volumes of work carried out by road machines while ensuring the life cycle of roads and the stages of the life cycle of road machines through their performance. The purpose of this article is to show how the technical, operational planned (necessary) and actual performance of road machines was determined when working at specific facilities during the experiment.

**Keywords:** road machine, road life cycle, road machine life cycle, productivity.

**Date of acceptance for publication:** 24.02.2021

**Date of publication:** 25.03.2021

**Authors' information:**

**Stanislav M. Grushetsky** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Doctoral candidate of the Department of "Land Transport and Technological Vehicles" at Saint-Petersburg State University Architecture and Civil Engineering, e-mail: grushetsky.stanislav@yandex.ru.

**Sergey A. Evtuykov** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Land Transport and Technological Vehicles" at Saint-Petersburg State University Architecture and Civil Engineering, e-mail: s.a.evt@mail.ru.

**Sergey V. Repin** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Land Transport and Technological Vehicles" at Saint-Petersburg State Uni-

Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
e-mail: repinserge@mail.ru.

**Кузнецов Артем Александрович** – соискатель кафедры «Наземные транспортно-технологические машины», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
e-mail: eltechfifa@gmail.com.

† university Architecture and Civil Engineering,  
† e-mail: repinserge@mail.ru.

† **Artem A. Kuznecov** – Applicant of the Department of "Land Transport and Technological Vehicles", at Saint-Petersburg State University Architecture and Civil Engineering, e-mail: eltechfifa@gmail.com.

## 1. Введение

При проектировании, производстве, эксплуатации дорожных машин рассматривают три основных вида производительностей машин: конструктивно-расчётную, техническую и эксплуатационную. В статье будут рассматриваться техническая и эксплуатационная производительности дорожных машин. Эксплуатационная производительность будет рассматриваться двух видов – это эксплуатационная плановая производительность и эксплуатационная фактическая производительность. Выбор видов производительности дорожных машин обусловлен прежде всего условиями проведения эксперимента.

Под технической производительностью следует понимать максимально возможную производительность конкретной дорожной машины с учётом её технических характеристик в конкретных условиях работы.

Под эксплуатационной плановой производительностью следует понимать необходимую производительность конкретной дорожной машины для выполнения требуемого объёма работ, к которой надо стремиться при работе дорожных машин.

Под эксплуатационной фактической производительностью следует понимать фактическую (реальную) производительность конкретной дорожной машины при выполнении требуемого объёма работ.

В эксперименте участвовали 78 дорожных машин для строительства, реконструкции, ремонта и содержания автомобильных дорог шести функциональных групп:

- машины для землеройных и земляных работ;
- грузоподъёмные машины;
- машины для работы с асфальтобетонными смесями – машины асфальтовой группы;
- машины для уплотнения грунта и укладки асфальта;

- коммунальные машины для содержания автомобильных дорог и машины для нанесения горизонтальной дорожной разметки (маркировочные машины).

Выбранные дорожные машины работали в четырёх регионах Российской Федерации: Нижегородской, Московской и Ленинградской областях, г. Санкт-Петербург.

Эксперимент осуществлялся в течение одного года с ноября 2019 г. до ноября 2020 г. Выбранные машины асфальтовой группы – дорожные фрезы (9 машин), автогудронаторы (9 машин), асфальтоукладчики (9 машин) и асфальтовые катки (6 машин) в период с 16 ноября 2019 г. до 16 апреля 2020 г. не работали в силу сезонных изменений. Машины для нанесения горизонтальной дорожной разметки (9 машин) по той же причине не работали с 01 ноября 2019 г. до 01 мая 2020 г. Остальные из общего числа дорожных машин работали в течение всего рассматриваемого периода, т.е. один год.

Для проведения эксперимента были заключены соглашения между Санкт-Петербургским государственным архитектурно-строительным университетом и тремя крупными дорожными организациями, расположенными и осуществляющими профессиональную деятельность на территории Российской Федерации в разных регионах: АО «СМУ-Дондорстрой», ФКУ «Центравтоммагистраль» и АО «ПО РосДорСтрой». Данные соглашения подразумевали двухсторонний обмен информацией, представляющей научный интерес в области эксплуатации дорожных машин.

В основу выбора дорожных машин для проведения исследования были положены следующие требования и принципы.

1. Все дорожные машины должны работать на дорогах федерального значения. Это требование продиктовано тем, что практически на всех машинах, занятых в производст-



венном процессе на дорогах федерального значения, устанавливается система мониторинга, которая позволяет отслеживать в разных режимах основные рабочие параметры машин. К основным рабочим параметрам дорожных машин относятся: локация, уровень топлива в баке, расход топлива и напряжение бортовой сети. Практически на всех исследуемых машинах устанавливается большое количество датчиков, которые позволяют контролировать параметры рабочих органов и двигателя. Практически на всех дорожных машинах, работающих на федеральных дорогах, применяются автоматические или полуавтоматические рабочие системы, гарантирующие качество выполняемых работ.

2. Рассматриваемые дорожные машины должны работать в режиме одной, двух или трёх смен в течение суток. Дорожная машина в течение смены работает 8 ч. Возможны кратковременные остановки в работе дорожной машины на смену оператора. Исключением является возникновение отказов в работе дорожной машины или выполнение работ по её плановому техническому обслуживанию. Уменьшение потерь рабочего времени обеспечивается в основном вахтовым методом работы на объектах. Если оператор дорожной машины в течение смены отдыхает, то в это время его заменяет другой оператор.

3. Необходимо выбирать дорожные машины, которые участвуют в полном цикле работ по строительству, реконструкции, ремонту и содержанию автомобильных дорог. Независимо от того, на каком объекте работает дорожная машина, а именно, на строительстве, реконструкции, ремонте и содержании автомобильных дорог применяются дорожные машины всех шести вышеуказанных функциональных групп. Разница заключается только в объёмах выполняемых работ. Поэтому при проведении эксперимента дорожные машины выбирались по принципу максимальной или средней их загрузки, чтобы вероятность проявления всех качеств дорожных машин как положительных, так и отрицательных была высока.

4. Для объективности проведения исследований дорожных машин всех функцио-

нальных групп необходимо их разделить по возрастным группам. Целесообразно рассмотреть три возрастные группы:

- машины до пяти лет;
- машины от пяти до десяти лет;
- машины десяти лет и старше.

На объектах работ можно встретить дорожные машины всех трёх возрастных групп. Необходимо учитывать, что в современных условиях идёт тенденция на омоложение парка дорожных машин, но несмотря на это, в эксплуатации при строительстве, реконструкции, ремонте и содержании автомобильных дорог находятся достаточно большое количество дорожных машин второй и третьей возрастных групп. Это объясняется тем, что под модернизацией парка дорожных машин подразумевается не только приобретение новых дорогостоящих дорожных машин, но и проведение мероприятий по поддержанию их технически исправного состояния [1, 2]. Кроме того, при строительстве, реконструкции, ремонте и содержании автомобильных дорог требуется выполнение большого количества вспомогательных операций, для выполнения которых прекрасно подходят дорожные машины второй и третьей возрастных групп. Поэтому вопрос о целесообразности продолжения эксплуатации дорожной машины является и остаётся очень актуальной научной задачей [1, 2]. В связи с этим, в каждой функциональной группе при выборе машин было стремление найти машины одной марки в каждой возрастной группе.

В качестве примера в табл.1 приведены данные о 9 дорожных машинах из их общего количества. Эти дорожные машины принимали участие в эксперименте при строительстве, реконструкции, ремонте и содержании автомобильных дорог и соответствуют всем четырём вышеуказанным принципам.

## 2. Постановка задачи

Для достижения вышеуказанных целей были поставлены и решены следующие задачи.

1. Необходимо установить для выбранных выше дорожных машин планируемую объёмы работ и время их работы при строительстве, реконструкции, ремонте и содержа-

Таблица 1  
Возрастные данные дорожных машин

Марка, возраст	до 5 лет	от 5 до 10 лет	10 лет и старше
Экскаватор-погрузчик JCB 3СХ	+	+	+
Асфальтоукладчик Volvo ABG P6820С	+	+	+
Коммунальная машина КамАЗ 65115	+	+	+

нии автомобильных дорог на конкретных объектах посуточно в рассматриваемый период [3, 11].

2. Необходимо установить для выбранных выше дорожных машин факт выполнения объёмов работ и время их работы при строительстве, реконструкции, ремонте и содержании автомобильных дорог на конкретных объектах посуточно в рассматриваемый период.

3. Необходимо обосновать и определить техническую производительность выбранных выше дорожных машин при строительстве, реконструкции, ремонте и содержании автомобильных дорог [7, 8, 11].

4. Необходимо определить экспериментальным путём среднее значение часовой эксплуатационной плановой производительности за сутки в течение рассматриваемого периода для выбранных выше дорожных машин путём интегрирования плановых объёмов работ;

5. Необходимо определить экспериментальным путём среднее значение часовой эксплуатационной фактической производительности за сутки в течение рассматриваемого периода для выбранных дорожных машин путём интегрирования фактических объёмов работ.

6. Проанализировать и дать оценку полученным результатам [4].

### 3. Разработанные модели, методы

Исследование представляет собой сочетание логического анализа, инженерных расчётов и метода экспертных оценок получаемой информации [5, 7, 11].

Все выбранные для эксперимента дорожные машины работали в тяжёлых и средних

по нагрузке условиях на федеральных объектах строительства:

- автомобильная дорога М7 «Волга», работы по строительству, реконструкции, ремонту и содержанию автомобильных дорог в рамках государственных контрактов (№162, 484, 199, 269, 438 и др.);

- автомобильная дорога А-108 «Большое Московское кольцо», работы по ремонту (капитальному) и содержанию автомобильной дороги в рамках распоряжения Росавтодора № 1054-р от 20.06.2017 года (ПИР 2017-2019, ПИР 2015-2020, ПИР 2019-2020);

- автомобильная дорога А-118 «Кольцевая автомобильная дорога вокруг г. Санкт-Петербурга», работы по ремонту (местному и капитальному) и содержанию автомобильных дорог.

Определение планируемых объёмов работ осуществлялось расчётно-практическим способом. Были изучены первичные основополагающие документы по каждому из объектов:

- паспорта рассматриваемых объектов;
- государственные контракты с подрядными организациями;
- планы и карты местности;
- особенности регионов в том числе климатические;
- рабочие журналы и тетради мастеров, а также начальников дорожных участков;
- сменные рапорты ЭСМ-3, 7.

Были осуществлены поездки по объектам строительства, реконструкции, ремонту и содержанию автомобильных дорог в течение рассматриваемого периода. Таким образом, были получены значения планируемых объёмов работ и времени работы выбранных дорожных машин посуточно в течение одного года в рассматриваемый период. Значения планируемых объёмов работ, выбранных дорожных машин были сведены в специальные таблицы.

Для примера в табл. 2 показаны значения планируемых объёмов работ  $Q_p$  только девяти (табл.1) дорожных машин, а также часы их работы  $T_p$  посуточно в течение первых семи дней одного месяца работы. Для трёх экскаваторов-погрузчиков и трёх асфальтоукладчиков – за июль 2020 г. Для трёх ком-

мунальных машин для содержания автомобильных дорог – за февраль 2020 г. Выбор месяца работы дорожных машин обусловлен загрузкой выбранных машин в рассматриваемый период времени.

Далее была проведена работа по определению суточных фактических объёмов работ и времени работы выбранных дорожных машин за рассматриваемый период. Кроме изучения всех необходимых рабочих документов практически непрерывно вёлся анализ работы системы мониторинга дорожных машин, установленной на всех выбранных

дорожных машинах, что значительно упростило сбор объективной информации о работе дорожных машин на объектах. Были определены, как минимум: перемещения дорожных машин; удельный расход топлива; напряжение бортовой сети, выполнение рабочих операций с грузом и без; обработанные дорожные участки за смену, за сутки, за месяц и год [6]. В качестве примера на рис. 1 представлено рабочее окно системы мониторинга для коммунальной машины для содержания автомобильных дорог, участвующей в эксперименте.

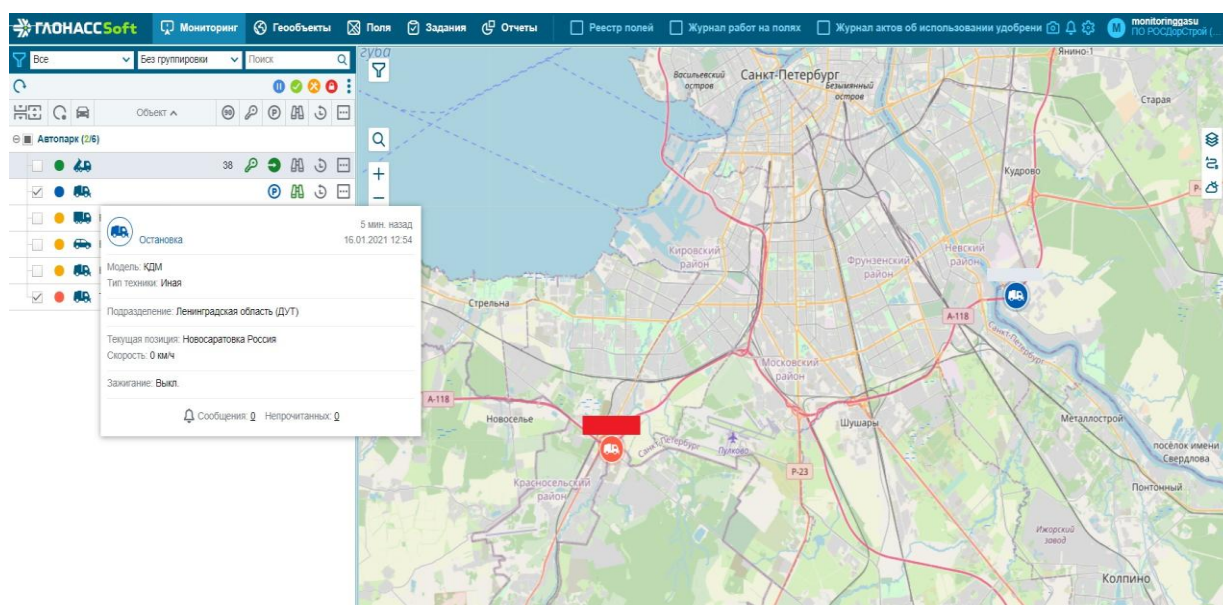


Рис.1. Рабочее окно системы мониторинга

Таблица 2

Значения суточных планируемых объёмов работ  $Q_{п}$  и времени работы  $T_{п}$  девяти дорожных машин, участвовавших в эксперименте в течение первых семи дней одного месяца работы

Машина	JCB 3CX			Volvo ABG P6820C			КамАЗ 65115			Число месяца
	до 5 лет	5 – 10 лет	10 лет и старше	до 5 лет	5 – 10 лет	10 лет и старше	до 5 лет	5 – 10 лет	10 лет и старше	
$T_{п}$	23 м <sup>3</sup> /ч			250 м <sup>2</sup> /ч			90000 м <sup>2</sup> /ч			
$Q_{п}/ T_{п}$	224/16	231/16	66/8	1945/16	4923/24	421/8	1392/24	1038/16	646/16	1
$Q_{п}/ T_{п}$	192/16	140/8	75/8	733/8	1908/16	699/8	808/16	702/16	1187/16	2
$Q_{п}/ T_{п}$	231/16	441/24	282/16	2543/16	225/16	3854/24	368/8	1036/16	272/8	3
$Q_{п}/ T_{п}$	99/8	140/8	64/8	2989/16	1659/16	2331/16	2064/24	847/16	1247/16	4
$Q_{п}/ T_{п}$	440/24	194/16	160/16	4073/24	1299/8	3679/24	610/16	532/8	499/8	5
$Q_{п}/ T_{п}$	428/24	128/8	96/8	2576/16	1431/8	1635/16	1348/24	1561/24	1447/24	6
$Q_{п}/ T_{п}$	402/24	199/16	332/24	3533/24	3389/24	2556/16	1890/24	591/16	448/8	7

Таким образом, были получены значения фактических объёмов работ выбранных дорожных машин и время их работы посуточно в течение одного года в рассматриваемый период. Данные значения для 78 дорожных машин, участвовавших в эксперименте, были сведены в специальные таблицы по месяцам. Для примера в табл. 3 представлены значения суточных фактических объёмов работ  $Q_{\Phi}$  и времени работы  $T_{\Phi}$  дорожных машин, участвовавших в эксперименте в течение первых семи дней одного месяца работы.

Особое внимание необходимо обратить на процесс определения технической производительности выбранных дорожных машин.

Техническая производительность является характеристикой дорожных машин, необходимой для решения ряда практических задач [7, 9]. Одной из таких задач является выбор самой машины. Анализ технических характеристик рассматриваемых дорожных машин показал, что техническая производительность, указываемая заводом-изготовителем, имеет максимальное значение для условий далёких от реальности; либо не указывается при каких условиях определены данные значения или значения технической производительности вообще отсутствуют в нормативных и достоверных источниках.

Таблица 3

Значения суточных фактических объёмов работ  $Q_{\Phi}$  и времени работы  $T_{\Phi}$  девяти дорожных машин, участвовавших в эксперименте в течение первых семи дней одного месяца работы

Машина	JCB 3CX			Volvo ABG P6820C			КамАЗ 65115			Число месяца
	до 5 лет	5 – 10 лет	10 лет и старше	до 5 лет	5 – 10 лет	10 лет и старше	до 5 лет	5 – 10 лет	10 лет и старше	
$P_T$	23 м <sup>3</sup> /ч			250 м <sup>2</sup> /ч			90000 м <sup>2</sup> /ч			
$Q_{\Phi}/T_{\Phi}$	246/16	269/16	PEM	2262/16	5470/24	473/8	1547/24	1180/16	778/16	1
$Q_{\Phi}/T_{\Phi}$	228/16	143/8	88/8	894/8	2245/16	804/8	998/16	771/16	1413/16	2
$Q_{\Phi}/T_{\Phi}$	282/16	795/24	313/16	2677/16	2649/16	4534/24	490/8	1264/16	320/8	3
$Q_{\Phi}/T_{\Phi}$	121/8	159/8	61/8	3475/16	2272/16	2711/16	1985/24	1169/16	1401/16	4
$Q_{\Phi}/T_{\Phi}$	506/24	226/16	190/16	5359/24	1547/8	4181/24	803/16	657/8	587/8	5
$Q_{\Phi}/T_{\Phi}$	503/24	158/8	107/8	3346/16	1684/8	2044/16	1498/24	1858/24	1702/24	6
$Q_{\Phi}/T_{\Phi}$	496/24	191/16	382/24	4308/24	4184/24	3156/16	2032/24	777/16	503/8	7

Это объясняется рядом факторов. В различных условиях работы дорожной машины техническая производительность будет существенно различаться. Поэтому завод-изготовитель, как правило, в инструкциях по эксплуатации и других документах указывает геометрические размеры рабочих органов и рабочие скорости перемещения дорожной машины, что даёт возможность для конкретных условий эксплуатации дорожных машин определить её техническую производительность (максимальное значение) [3, 7, 8]. Именно таким образом были определены технические характеристики производительности всех 78 дорожных машин, участвовавших в эксперименте, в том числе и 9 указанных выше в табл. 1.

Например, для экскаваторов-погрузчиков марки JCB 3CX расчёт технической производительности выполнялся следующим образом. Они имеют следующие технические характеристики: глубина копания 5460 мм; масса 8445 кг; объём фронтального ковша на

конкретных машинах 1 м<sup>3</sup>; объём ковша экскаватора на конкретных машинах 0,4 м<sup>3</sup>; мощность двигателя 68,6 кВт. После длительного наблюдения за работой данной марки машин в течение нескольких месяцев было установлено, что при строительстве, реконструкции, ремонте и содержании автомобильных дорог данные дорожные машины в равной степени имеют загрузку как работая в режиме бульдозера-погрузчика, так и в режиме экскаватора. Работая, в основном, с такими материалами как песок, щебень и т.д., минимальное время цикла в режиме бульдозера-погрузчика с максимально заполненным ковшом (с горкой) не превышает 2,6 мин.; в режиме экскаватора не превышает 1,0...1,1 мин. Максимальное число циклов, которое может совершить данная машина с полностью заполненным ковшом погрузчика или экскаватора в конкретных условиях для режима бульдозера составляет 23 цикла/ч, для режима экскаватора - 55...60 циклов/ч.

Под циклом понимается процесс полной загрузки ковша, подъём, поворот, опускание, рабочие передвижения машины и выгрузка ковша [9]. Таким образом, техническая производительность в рассматриваемых условиях экскаваторов-погрузчиков марки JCB 3СХ составляет 23 м<sup>3</sup>/ч.

После проведения подготовительных работ по проведению эксперимента были определены посуточно средние значения эксплуатационной плановой и фактической часовой производительностей путём интегрирования суточных значений планируемых и фактических объёмов работ по времени следующим образом:

$$P_{\text{ЭП}_j} = \int_i^{i_n} \frac{Q_{\text{П}_j} dt_i}{T_{\text{П}_j}}; \quad (1)$$

$$P_{\text{ЭФ}_j} = \int_i^{i_n} \frac{Q_{\text{Ф}_j} dt_i}{T_{\text{Ф}_j}} \quad (2)$$

где  $P_{\text{ЭП}_j}$ ,  $P_{\text{ЭФ}_j}$  – средние значения часовой эксплуатационной, соответственно, плановой и фактической производительностей для каждой  $j$ -ой выбранной дорожной машины за одни сутки её работы в рассматриваемый период времени по месяцам;  $i-i_n$  – дни месяцев в течение рассматриваемого периода времени;  $Q_{\text{П}_j}$ ,  $Q_{\text{Ф}_j}$  – суточные значения, соответственно, плановых и фактических объёмов

работ каждой  $j$ -ой выбранной дорожной машины в рассматриваемой период времени по месяцам;  $T_{\text{П}_j}$ ,  $T_{\text{Ф}_j}$  – время работы каждой  $j$ -ой выбранной дорожной машины в течение суток, соответственно, плановые и фактические значения.

В результате интегрирования суточных значений плановых и фактических объёмов работ по времени были получены и сведены в таблицы средние значения часовой эксплуатационной, соответственно, плановой и фактической производительностей для каждой выбранной дорожной машины за одни сутки её работы в рассматриваемой период времени, т.е. в течение одного года по месяцам. Каждый месяц при этом рассматривался отдельно.

В качестве примера в табл. 4 полученные значения показаны для 9 выбранных дорожных машин (табл.1) за первые 7 дней их работы в начале месяца.

Были построены графические и математические зависимости изменения средних значений часовой эксплуатационной плановой и фактической производительностей рассматриваемых дорожных машин по дням в рассматриваемый период. Каждый месяц рассматривался отдельно. На рис. 2 - 4 показаны графические зависимости для 9 выбранных дорожных машин.

Таблица 4

Средние суточные значения часовой эксплуатационной, соответственно, плановой и фактической производительностей для девяти выбранных дорожных машин за семь дней их работы в начале месяца

Число месяца	Июль 2020 года											
	Экскаваторы-погрузчики JCB 3СХ											
	до 5 лет				от 5 до 10 лет				10 лет и старше			
	$P_{\text{ЭП}}$ , м <sup>3</sup> /ч	$P_{\text{ЭФ}}$ , м <sup>3</sup> /ч	$K_{\text{ТИ}}$	$K_{\text{ТГ}}$	$P_{\text{ЭП}}$ , м <sup>3</sup> /ч	$P_{\text{ЭФ}}$ , м <sup>3</sup> /ч	$K_{\text{ТИ}}$	$K_{\text{ТГ}}$	$P_{\text{ЭП}}$ , м <sup>3</sup> /ч	$P_{\text{ЭФ}}$ , м <sup>3</sup> /ч	$K_{\text{ТИ}}$	$K_{\text{ТГ}}$
1	14,0	15,4	1,10	0,65	14,5	16,8	1,16	0,72	8,3	ремонт		
2	12,0	14,3	1,19	0,61	17,5	17,9	1,02	0,76	9,4	11,0	1,18	0,47
3	14,5	17,6	1,22	0,75	18,4	20,6	1,12	0,88	17,6	19,6	1,11	0,83
4	12,4	15,1	1,22	0,64	17,5	19,9	1,14	0,85	8,0	7,6	0,95	0,32
5	18,3	21,1	1,15	0,90	12,1	14,1	1,16	0,60	10,0	11,9	1,19	0,51
6	17,8	21,0	1,18	0,89	16,0	19,8	1,23	0,84	12,0	13,4	1,11	0,57
7	16,7	20,7	1,23	0,88	12,4	11,9	0,96	0,51	13,8	15,9	1,15	0,68

Окончание табл. 4

Число месяца	Июль 2020 года											
	Асфальтоукладчики Volvo ABG P6820C											
	до 5 лет				от 5 до 10 лет				10 лет и старше			
	П <sub>эп</sub> , м <sup>3</sup> /ч	П <sub>эф</sub> , м <sup>3</sup> /ч	К <sub>ти</sub>	К <sub>тг</sub>	П <sub>эп</sub> , м <sup>3</sup> /ч	П <sub>эф</sub> , м <sup>3</sup> /ч	К <sub>ти</sub>	К <sub>тг</sub>	П <sub>эп</sub> , м <sup>3</sup> /ч	П <sub>эф</sub> , м <sup>3</sup> /ч	К <sub>ти</sub>	К <sub>тг</sub>
1	121,6	141,4	1,16	0,57	205,1	227,9	1,11	0,91	52,6	59,1	1,12	0,24
2	91,6	111,8	1,22	0,45	119,3	140,3	1,18	0,56	87,4	100,5	1,15	0,40
3	159,0	148,6	0,93	0,59	139,1	165,6	1,19	0,66	160,6	188,9	1,18	0,76
Число месяца	Июль 2020 года											
	Асфальтоукладчики Volvo ABG P6820C											
	до 5 лет				до 5 лет				до 5 лет			
	П <sub>эп</sub> , м <sup>3</sup> /ч	П <sub>эф</sub> , м <sup>3</sup> /ч	К <sub>ти</sub>	К <sub>тг</sub>	П <sub>эп</sub> , м <sup>3</sup> /ч	П <sub>эф</sub> , м <sup>3</sup> /ч	К <sub>ти</sub>	К <sub>тг</sub>	П <sub>эп</sub> , м <sup>3</sup> /ч	П <sub>эф</sub> , м <sup>3</sup> /ч	К <sub>ти</sub>	К <sub>тг</sub>
4	186,8	217,2	1,16	0,87	103,7	142,0	1,37	0,57	145,7	169,4	1,16	0,68
5	169,7	223,3	1,32	0,89	162,4	193,4	1,19	0,77	153,3	174,2	1,14	0,70
6	161,0	209,1	1,30	0,84	178,9	210,5	1,18	0,84	102,2	127,8	1,25	0,51
7	147,2	179,5	1,22	0,72	141,2	174,3	1,23	0,70	159,8	197,3	1,23	0,79
Число месяца	Февраль 2020 года											
	Коммунальные дорожные машины (КДМ) КамАЗ 65115											
	до 5 лет				от 5 до 10 лет				10 лет и старше			
	П <sub>эп</sub> , м <sup>3</sup> /ч	П <sub>эф</sub> , м <sup>3</sup> /ч	К <sub>ти</sub>	К <sub>тг</sub>	П <sub>эп</sub> , м <sup>3</sup> /ч	П <sub>эф</sub> , м <sup>3</sup> /ч	К <sub>ти</sub>	К <sub>тг</sub>	П <sub>эп</sub> , м <sup>3</sup> /ч	П <sub>эф</sub> , м <sup>3</sup> /ч	К <sub>ти</sub>	К <sub>тг</sub>
1	58,0	64,5	1,11	0,72	64,9	73,8	1,14	0,82	40,4	48,6	1,20	0,54
2	50,5	62,4	1,23	0,69	43,9	48,2	1,10	0,54	74,2	88,3	1,19	0,98
3	45,9	61,3	1,33	0,68	64,8	79,0	1,22	0,88	34,0	40,0	1,18	0,44
4	86,0	82,7	0,96	0,92	59,2	73,1	1,23	0,81	77,9	87,6	1,12	0,97
5	38,1	50,2	1,32	0,56	66,5	82,1	1,23	0,91	62,4	73,4	1,18	0,82
6	56,2	62,4	1,11	0,69	65,0	77,4	1,19	0,86	60,3	70,9	1,18	0,79
7	78,7	84,7	1,08	0,94	36,9	48,6	1,32	0,54	56,0	62,9	1,12	0,70

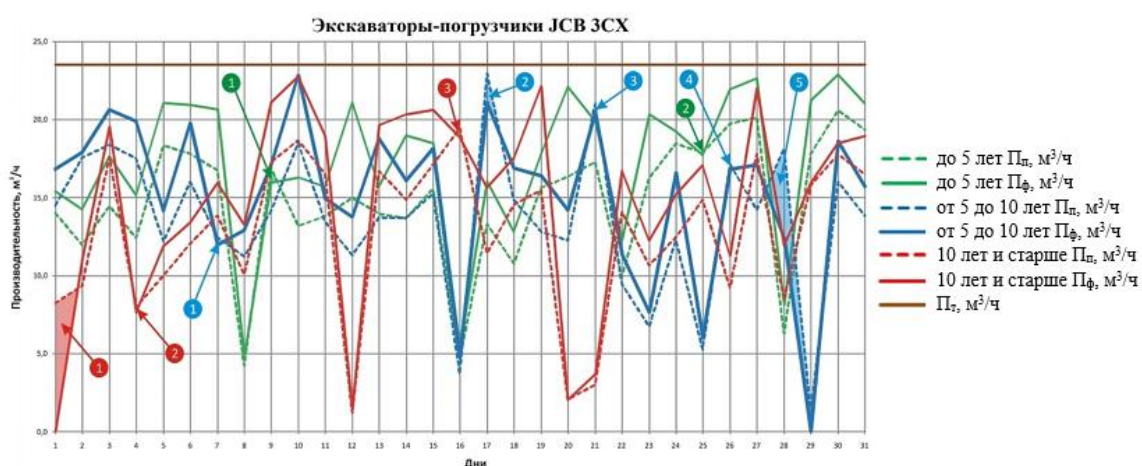


Рис. 2. График изменения средних значений часовой эксплуатационной плановой и фактической производительностей трёх экскаваторов-погрузчиков марки JCB 3CX по дням в течение июля 2020 г.

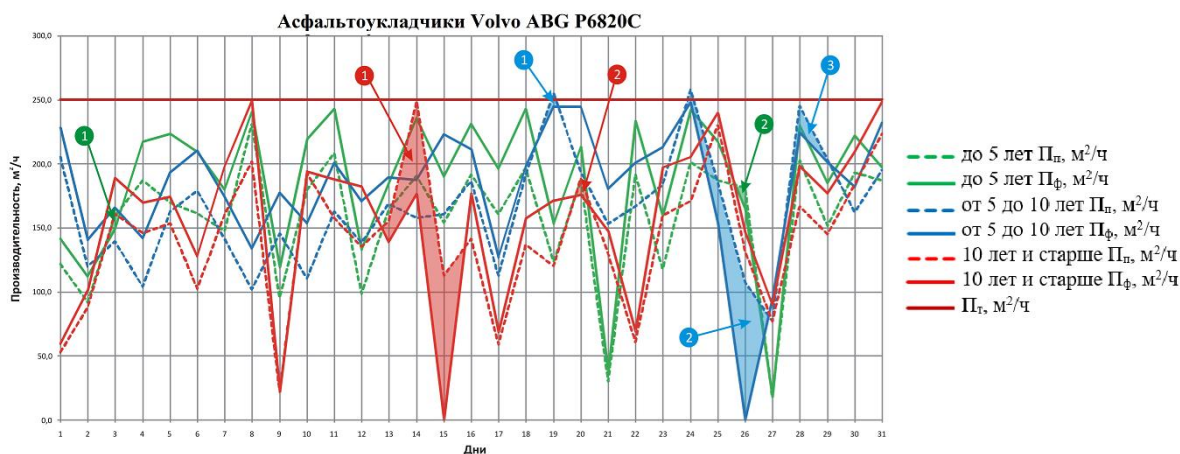


Рис. 3. График изменения средних значений часовой эксплуатационной плановой и фактической производительностей трёх асфальтоукладчиков марки Volvo ABG P 682 OC по дням в течение июля 2020 г.

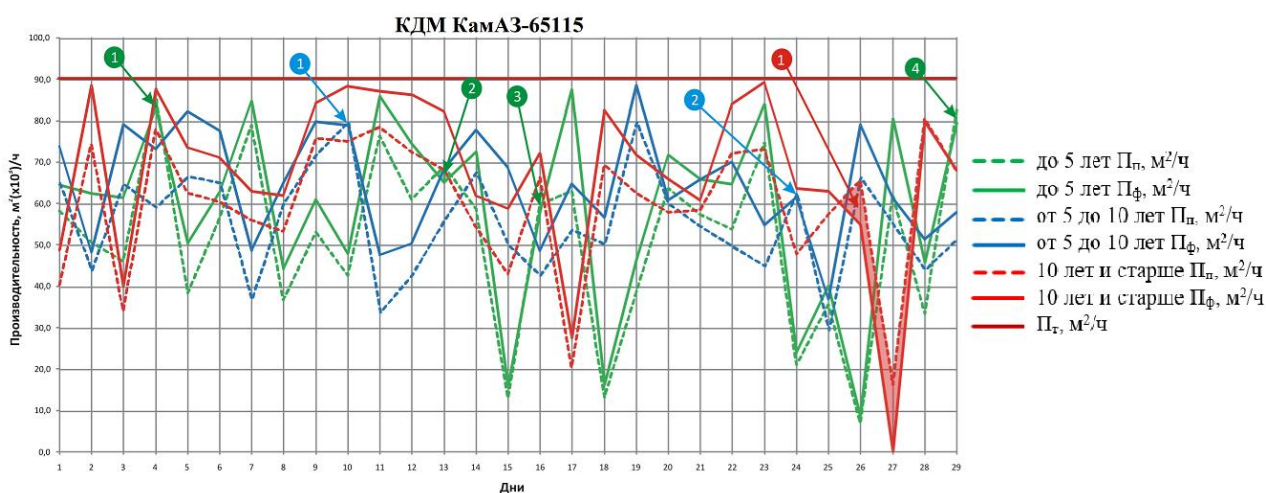


Рис. 4. График изменения средних значений часовой эксплуатационной плановой и фактической производительностей трёх коммунальных машин для содержания автомобильных дорог марки КамАЗ-65115 по дням в течение февраля 2020 г.

#### 4. Результаты и их анализ

После того, как в результате интегрирования значений плановых и фактических объёмов работ по времени были получены средние часовые значения эксплуатационной плановой и фактической производительностей рассматриваемых дорожных машин по дням в течение рассматриваемого периода по месяцам, был осуществлён анализ полученных результатов. Полученные зависимости являются графическими и математическими моделями работы выбранных дорожных машин на конкретных объектах с учётом всех этапов их жизненного цикла [4, 10]. Полученные модели позволяют исследовать связь

между объёмами работ и этапами жизненного цикла дорожных машин через производительность.

Исследование полученных зависимостей позволяет решить следующие основные задачи.

1. Произвести оценку дорожной машины на всех этапах её жизненного цикла. Это осуществляется сравнительным анализом определённых расчётным и экспериментальным путями технической, эксплуатационных плановой и фактической производительностей. На рис. 2 - 4 техническая производительность дорожной машины показана сплошной линией коричневого цвета. Именно данная линия характеризует этап проек-

тирования и производства дорожной машины. Далее на каждом из рисунков пунктирными линиями показаны эксплуатационная плановая производительность, соответственно, зелёного цвета – машины до пяти лет; синего цвета – от пяти до десяти лет и красного цвета машины – от десяти лет и старше. Аналогично сплошными линиями показаны эксплуатационные фактические производительности дорожных машин трёх возрастных групп. Этап утилизации на данных зависимостях может рассматриваться последними значениями сплошных линий красного цвета. Речь идёт об оценке работоспособности конкретных дорожных машин, возраст которых составляет десять лет и старше, что позволяет принять объективное решение о целесообразности их дальнейшего применения. Утилизация в данном случае является следствием принятого решения, когда продолжение эксплуатации конкретной дорожной машины нецелесообразно. Дорожные машины третьей возрастной группы ближе всех находятся к этапу утилизации. Поэтому потенциально решение об утилизации дорожной машины может быть принято в любой момент времени при работе дорожной машины третьей возрастной группы. Таким образом, на каждой из полученных зависимостей можно увидеть все этапы жизненного цикла дорожной машины одной марки трёх возрастных групп в течение рассматриваемого периода.

2. Установить места и участки выполнения или не выполнения производственного плана каждой исследуемой дорожной машины посуточно в рассматриваемый период. Нормальной работой дорожной машины является ситуация, когда среднее значение часовой эксплуатационной фактической производительности за сутки выше или равно аналогичному значению эксплуатационной плановой производительности [11]. Под местом невыполнения производственного плана в данном случае понимается конкретно день и время суток, когда произошло критическое падение эксплуатационной фактической производительности дорожной машины ниже планового значения. Такие места определяются на графиках (рис. 2 - 4) пересечением сплошных и пунктирных линий графика

ков одного цвета, когда динамика сплошной линии направлена вниз, а динамика пунктирной линии направлена вверх. Площадь зоны, образуемой их пересечением, есть не выполненная фактическая производительность дорожной машины. На рис. 2 - 4 можно увидеть нормальную (штатную) работу дорожной машины, т.е. выполнение производственного плана работ. Также можно увидеть места и участки, когда эксплуатационная фактическая производительность дорожной машины имеет значение ниже значения эксплуатационной плановой производительности. Такие места на графиках (рис. 2 - 4) показаны условными обозначениями в виде кружков со стрелками соответствующего цвета для машин одной марки разных возрастных групп. Цифрами в кружках обозначается последовательность событий по факту критического снижения эксплуатационной фактической производительности по отношению к эксплуатационной плановой производительности рассматриваемых дорожных машин в течение рассматриваемого месяца. На графиках зоны, образуемые пересечением сплошных и пунктирных линий одного цвета, если в начале таких зон динамика сплошной линии направлена вниз, а динамика пунктирной линии направлена вверх, наполнены заливкой соответствующего цвета (рис. 2 - 4).

3. Выявить причины снижения эксплуатационной фактической производительности в конкретных местах. Это осуществляется в основном с помощью системы мониторинга дорожных машин. Анализируется работа дорожных машин в течение суток за интересующий период. В частности, проверяются: расход топлива текущий и удельный; уровень топлива с момента заправки; моменты заправки топливом; возможные сливы топлива; все перемещения дорожных машин с учётом навигационных выбросов; напряжения в бортовой сети; положения рабочих органов; температуру эксплуатационных жидкостей и т.д. В результате возможно максимально объективно восстановить картину рабочего дня каждой дорожной машины в конкретное время. Дополнительно возможно изучение рабочих документов. Анализа системы мониторинга достаточно для выясне-



ния объективных причин снижения эксплуатационной фактической производительности [6, 8, 12]. Например, на рис. 5 - 8 (копии окон системы мониторинга дорожных машин) можно увидеть: нормальную плановую (рис.

5) работу дорожной машины, навигационные выбросы системы мониторинга дорожной машины (рис. 6), слив топлива дорожной машины (рис. 7), трудный запуск двигателя (рис. 8).

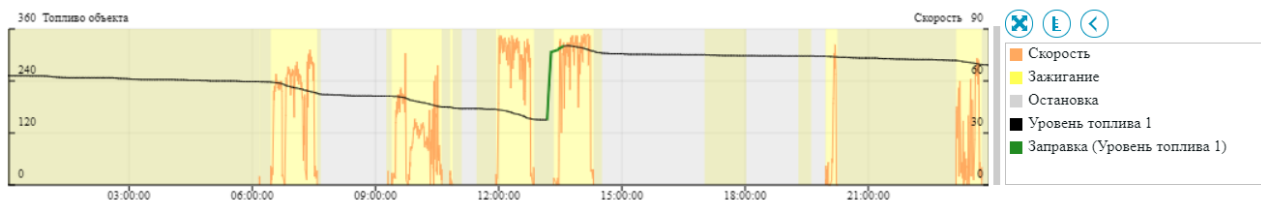


Рис. 5. Копия окна системы мониторинга дорожной машины при нормальной плановой работе дорожной машины

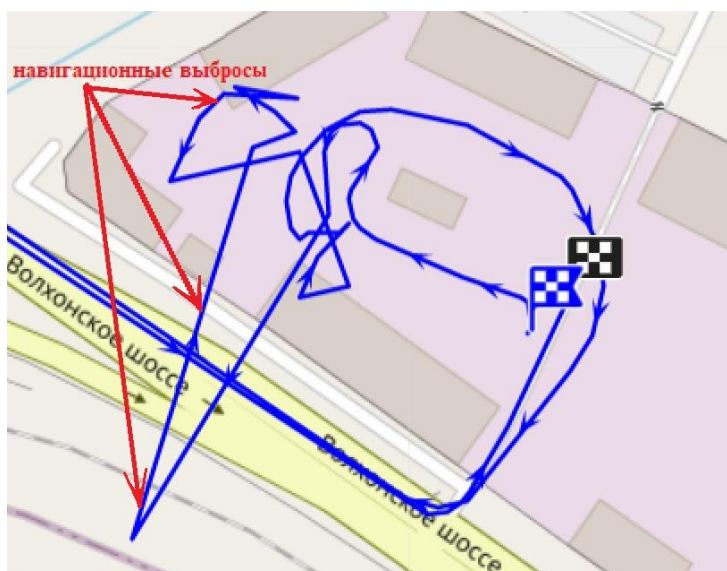


Рис. 6. Копия окна системы мониторинга дорожной машины при навигационных выбросах работы системы мониторинга дорожной машины

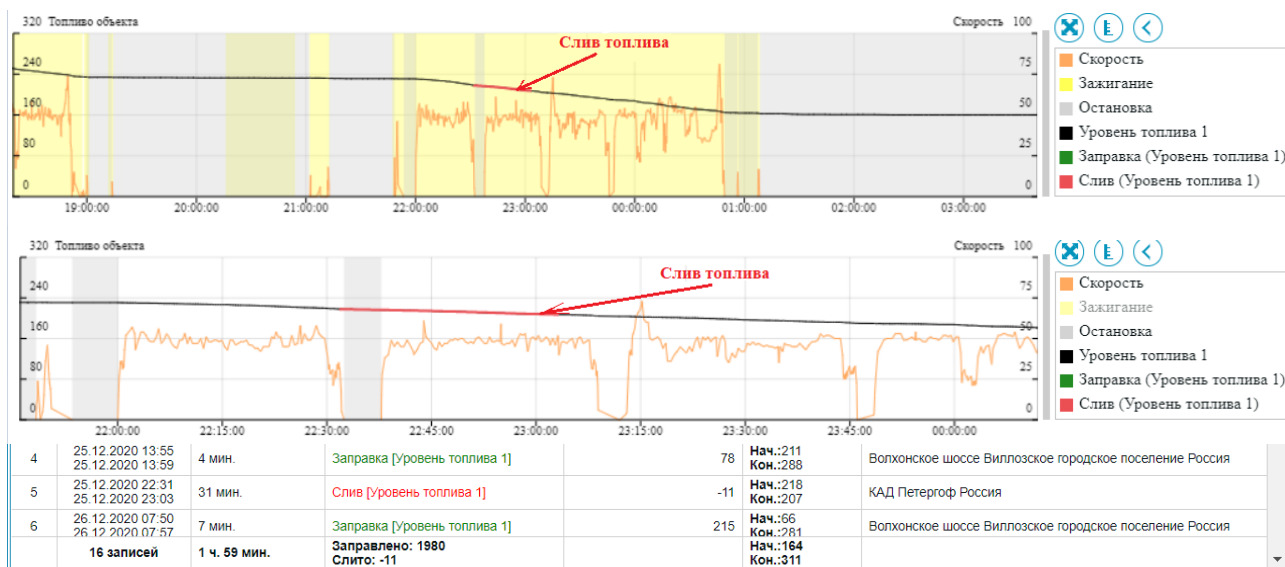


Рис. 7. Копия окна системы мониторинга дорожной машины при сливе топлива во время работы дорожной машины



Рис. 8. Копия окна системы мониторинга дорожной машины при трудном запуске двигателя во время работы дорожной машины

4. Выявить и не допустить снижение эксплуатационной фактической производительности ниже планового значения. Система мониторинга дорожной машины позволяет решить поставленную задачу с целью предупреждения и недопущения причин снижения эксплуатационной фактической производительности ниже планового значения [7, 8, 13]. Исключением в этой ситуации может быть возникновение отказа (отказов) в работе дорожной машины. Система мониторинга дорожной машины может в большинстве случаев эффективно способствовать предупреждению возникновению отказа (отказов) в работе дорожной машины [13, 14]. Например, в результате мониторинга дорожной машины и построения линии эксплуатационной фактической производительности режиме «онлайн» нетрудно спрогнозировать высокую вероятность пересечения пунктирной и сплошной линии одного цвета ещё до наступления данного события. Это является сигналом и серьёзным поводом усиления мониторинга конкретной дорожной машины для изменения динамики эксплуатационной фактической производительности дорожной машины. Возможно, в такой ситуации необходима замена конкретной дорожной машины другой дорожной машиной или принятие других оперативных решений. Необходимое и достаточное условие выполнения плановых объёмов работ конкретной дорожной

машины может быть выражено следующим соотношением

$$P_{\Phi_j} \geq P_{\Phi_j} \cdot \quad (3)$$

5. Определить фактические коэффициенты технического использования  $K_{т.и.}$  и технической готовности  $K_{т.г.}$  выбранных дорожных машин следующим образом:

$$K_{т.и.j} = P_{\Phi_j} / P_{\Phi_j}; \quad (4)$$

$$K_{т.г.j} = P_{\Phi_j} / P_{T_j}, \quad (5)$$

где  $K_{т.и.j}$  и  $K_{т.г.j}$  – фактические коэффициенты технического использования и технической готовности выбранных  $j$ -х дорожных машин;  $P_{T_j}$  – техническая производительность  $j$ -ой выбранной дорожной машины в течение рассматриваемого периода времени (табл. 2, 3).

Значения фактических коэффициентов технического использования и коэффициент технической готовности 9 выбранных дорожных машин (табл.1) представлены в табл. 4. Если значение фактического коэффициента технического использования больше единицы, то это свидетельствует о факте выполнения плана конкретной дорожной машиной за определённый день работы. Для примера на рис. 9 показаны значения  $K_{т.и.}$  и  $K_{т.г.}$  для экскаватора-погрузчика марки JCB 3CX третьей возрастной группы за июль 2020 г.

### Экскаватор-погрузчик JCB 3СХ более 10 лет

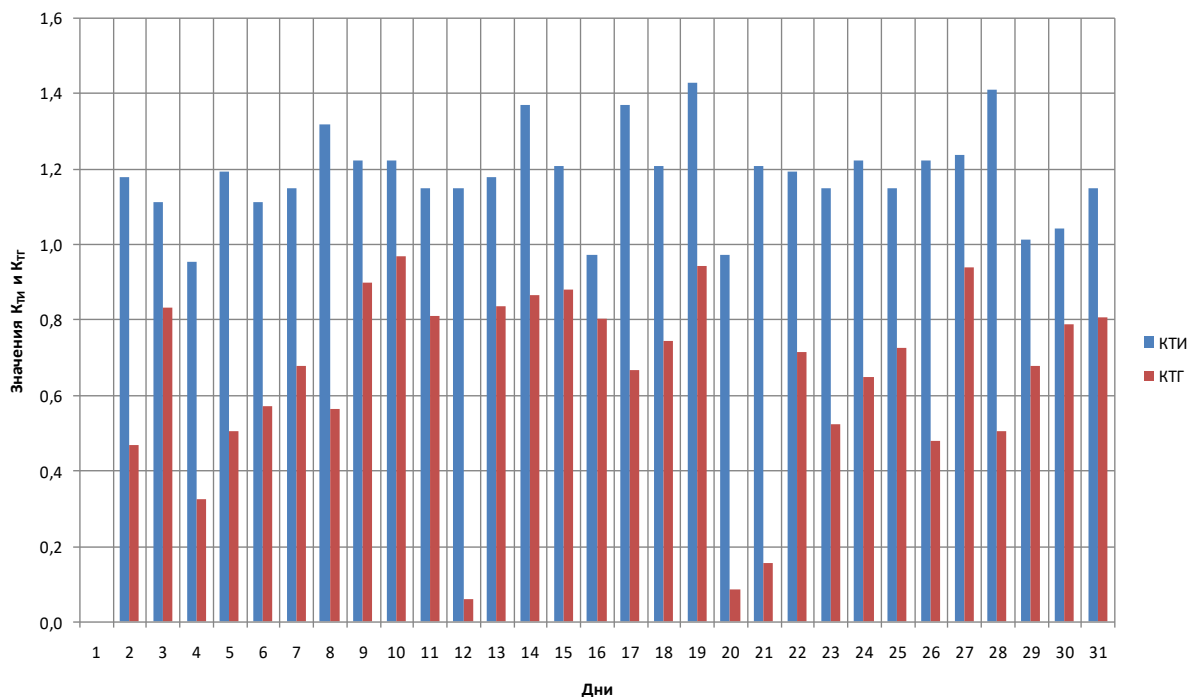


Рис. 9. Гистограммы значений  $K_{T.I.,j}$  и  $K_{T.G.,j}$  для экскаватора-погрузчика марки JCB 3СХ третьей возрастной группы за июль 2020 .

## 5. Заключение

Анализируя изложенный материал можно сделать вывод, что исследование связи между объёмами работ и этапами жизненного цикла дорожных машин на основе оценки производительности является перспективным, так как позволяет продолжить дальнейшую работу над вопросами обеспечения жизненного цикла дорожных машин, в том

числе, над вопросами прогнозирования производительности дорожных машин и определения состояния систем обеспечения жизненного цикла дорожных машин с точки зрения связей между этапами жизненного цикла. Решение поставленных перспективных задач позволит вывести вопросы эффективной эксплуатации дорожных машин на новый уровень [8, 15].

### Список литературы

1. Грушецкий С.М., Евтюков С.А., Репин С.В., Карро Г.А. Производительность как качественный критерий оценки эффективности всех этапов системы жизненного цикла дорожных машин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2020. № 4 (63). С. 36-42.

2. Евтюков С.А., Репин С.В., Грушецкий С.М., Карро Г.А. Формирование парка машин для строительства, реконструкции, ремонта и содержания автомобильных дорог с учетом этапов их жизненного цикла // Вестник Московского автомобильно-

### References

1. Grushetsky S.M., Yevtyukov S.A., Repin S.V., Carro G.A. Performance as a qualitative criterion for assessing the effectiveness of all stages of the life cycle system of road machines. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2020, No.4, pp. 36-42. (In Russian)

2. Yevtyukov S.A., Repin S.V., Grushetsky S.M., Carro G.A. Formation of a park of machines for the construction, reconstruction, repair and maintenance of automobile horns taking into account the stages of their life cycle. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo*

дорожного государственного технического университета. 2020. № 3 (62). С. 62-68.

3. Доценко А.И. Комплексный мониторинг параметров дорожных машин и асфальтобетонной смеси - основа повышения качества покрытий автомобильных дорог // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2018. № 2 (53). С. 89-93.

4. Евтюков С.А., Репин С.В., Грушецкий С.М., Карро Г.А. Научные задачи исследования жизненного цикла дорожных машин в современных условиях // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2020. № 4 (74). С. 442-451.

5. Кудяев А.Н., Косенко А.А., Бобров Д.В., Бобров В.Н. Исследование функционирования аппаратных средств мониторинга транспортных средств специального назначения // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 4-2. С. 255-259.

6. Мандровский К.П. Анализ систем мониторинга дорожно-строительных машин и концепция системы управления эффективностью // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2016. № 1 (44). С. 26-33.

7. Тагиева Н.К. Методика определения эксплуатационной производительности комбинированных дорожных машин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета. 2013. № 3 (34). С. 33-37.

8. Озорнин С.П., Бердников И.Е. Совершенствование организации мониторинга изменений технического состояния машин в эксплуатации // Вестник Забайкальского государственного университета. 2014. № 8. С. 64-69.

9. Мерданов Ш.М., Закирзаков Г.Г., Конеv В.В., Половников Е.В., Красиков А.А. Определение показателей эксплуатационных свойств современных строительно-дорожных машин // Фундаментальные исследования. 2016. № 12-2. С. 312-317.

10. Чооду О.А. Развитие систем планово-предупредительного ремонта горных и транспортно-технологических машин //

gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2020, No.3, pp. 62-68. (In Russian)

3. Docenko A.I. Comprehensive monitoring of parameters of road machines and asphalt concrete mixture - the basis for improving the quality of road pavements. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, No.2, pp. 89-93. (In Russian)

4. Yevtyukov S.A., Repin S.V., Grushetsky S.M., Carro G.A. Scientific tasks of the study of the life cycle of road machines in modern conditions. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo avtomobilno-dorozhnogo universiteta*, 2020, No.4, pp. 442-451. (In Russian)

5. Kudaev A.N., Kosenko A.A., Bobrov D.V., Bobrov V.N. Study of the functioning of hardware for monitoring special-purpose vehicles. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2016, No.4-2, pp. 255-259. (In Russian)

6. Mandrovsky K.P. Analysis of monitoring systems of road construction machines and concept of efficiency management system. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2016, No.1, pp. 26-33. (In Russian)

7. Tagieva N.K. Method of determination of performance of combined road machines. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No.3, pp. 33-37. (In Russian)

8. Ozornin S.P., Berdnikov I.E. Improving the organization of monitoring of changes in the technical condition of machines in operation. *Vestnik Zabajkalskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, No.8, pp. 64-69. (In Russian)

9. Merdanov Sh.M., Zakirzakov G.G., Konev V.V., Polovnikov E.V., Krasikov A.A. Determination of performance indicators of modern road construction machines. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2016, No.12-2, pp. 312-317. (In Russian)

10. Choodu O.A. Development of systems of planned preventive repair of mining and transport and technological machines. *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiiy i phisico-matematicheskiiy nauki*, 2019, No.3, pp. 37-49. (In Russian)

Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2019. № 3 (42). С. 37-49.

11. Кутузов В.В. Эффективность эксплуатации строительных и дорожных машин с учетом изменения их технического состояния // Технология колесных и гусеничных машин. 2015. № 3 (19). С. 57-64.

12. Мандровский К.П. Обобщенные характеристики надёжности в системе мониторинга эффективности дорожных машин. // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2016. № 3 (42). С. 63-72.

13. Манакон А.Л., Игумнов А.А., Коларж С.А. Создание системы мониторинга технического состояния транспортных и технологических машин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 4. С. 125-132.

14. Конев В.В., Созонов С.В., Половников Е.В., Леочко А.Н. Анализ датчиков для исследования теплового состояния машин // Транспортные и транспортно-технологические системы. Материалы международной научно-технической конференции. 2015. С. 159-164.

15. Мандровский К.П. Возможные перспективы развития систем мониторинга дорожных машин при управлении эффективностью и техническом аудите // Механизация строительства. 2016. Т. 77. № 10. С. 47-55.

11. Kutuzov V.V. Efficiency of operation of construction and road machines taking into account changes in their technical condition. *Tekhnologiya kolesnyh i gusenichnyh mashin*, 2015, No.3, pp. 57-64. (In Russian)

12. Mandrovsky K.P. Generalized reliability characteristics in the system for monitoring the performance of road vehicles. *Vestnik Tihookeanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, No.3, pp. 63-72. (In Russian)

13. Manakov A.L., Igumnov A.A., Kolarge S.A. Creation of a system for monitoring the technical condition of transport and technological machines. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2013, No.4, pp. 125-132. (In Russian)

14. Konev V.V., Sozonov S.V., Polovnikov E.V., Leochko A.N. Analysis of sensors for the study of the thermal state of machines. *Transportnye i transportno-tekhnologicheskie sistemy. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, 2015, pp. 159-164. (In Russian)

15. Mandrovsky K.P. Possible prospects for the development of monitoring systems for road machines with efficiency management and technical audit. *Mekhanizatsiya stroitelstva*, 2016, Vol. 77, No.10, pp. 47-55. (In Russian)

УДК (UDC) 621.778.1

О КРИТЕРИЯХ И НОРМАХ БРАКОВКИ КАНАТОВ ПАССАЖИРСКИХ  
КАНАТНЫХ ДОРОГABOUT CRITERIA AND STANDARDS FOR DISCHARGE OF ROPES  
OF PASSENGER ROPEWAYSПанфилов А.В., Короткий А.А., Иванов Б.Ф., Панфилова Э.А.  
Panfilov A.V., Korotkiy A.A., Ivanov B.F., Panfilova E.A.Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Россия)  
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

**Аннотация.** Рассмотрены критерии браковки канатов пассажирских канатных дорог, описаны основные дефекты несущих-тяговых, тяговых и несущих канатов, возможные причины их возникновения и критерии браковки. Дано теоретическое обоснование дефектов, связанных с пластическими деформациями канатной проволоки (выдавливание проволок, расслоение, перекручивание каната, перегибы, заломы, корзинообразность). Рассмотрены способы контроля состояния канатов в процессе эксплуатации пассажирских канатных дорог. Даны рекомендации по повышению уровня безопасности путем использования систем дистанционного мониторинга контроля, основанных на современных цифровых информационных технологиях. Предложены критерии браковки канатов пассажирских канатных дорог: по волнистости, износу и обрывам наружных проволок канатов, отсутствующие в действующих Федеральных нормах и правилах «Правила безопасности пассажирских канатных дорог и фуникулеров».

**Ключевые слова:** критерии и нормы браковки, дефекты канатов, система дистанционного мониторинга контроля.

**Дата принятия к публикации:** 01.03.2021  
**Дата публикации:** 25.03.2021

**Сведения об авторах:**

**Панфилов Алексей Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», e-mail: panfilov@ikcmysl.ru

ORCID 0000-0001-7211-1824

**Короткий Анатолий Аркадьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», e-mail: korot@novoch.ru

ORCID: 0000-0001-9446-4911

**Иванов Борис Фёдорович** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центра научных компетенций ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», e-mail: ivanov@ikc-mysl.ru

**Abstract.** The criteria for the rejection of ropes of Passenger cable cars are considered, the main defects of load-bearing, traction and load-bearing cables, possible causes of their occurrence and the criteria for rejection are described. The theoretical substantiation of defects associated with plastic deformations of the rope wire (extrusion of wires, stratification, twisting of the rope, kinks, breaks, basket shape) is given. The methods of monitoring the state of ropes in the process of operation of passenger cable cars are considered. Recommendations are given to improve the level of security by using remote monitoring systems based on modern digital information technologies. The criteria for rejecting the ropes of passenger cable cars are proposed: according to the undulation, wear and breakage of the outer wires of the ropes, which are absent in the current Federal Norms and rules "Rules for the safety of passenger cable cars and funiculars".

**Keywords:** rejection criteria and standards, rope defects, remote control monitoring system.

**Date of acceptance for publication:** 01.03.2021  
**Date of publication:** 25.03.2021

**Authors' information:**

**Aleksey V. Panfilov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department "Operation of transport systems and logistics" at Don State Technical University, e-mail: panfilov@ikcmysl.ru

ORCID: 0000-0001-7211-1824

**Anatoly A. Korotkiy** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department "Operation of Transport Systems and Logistics" at Don State Technical University, e-mail: korot@novoch.ru.

ORCID: 0000-0001-9446-4911

**Boris F. Ivanov** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Center for Scientific Communications, Don State Technical University, e-mail: ivanov@ikc-mysl.ru.

ORCID: 0000-0001-9080-5520

**Панфилова Эльвира Анатольевна** – кандидат философских наук, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», e-mail: korotkaya\_elvira@mail.ru  
ORCID 0000-0002-8485-598

ORCID: 0000-0001-9080-5520

**Elvira A. Panfilova** - Candidate of Philosophy Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department "Operation of transport systems and logistics" at Don State Technical University, e-mail: korotkaya\_elvira@mail.ru  
ORCID 0000-0002-8485-5983

## 1. Введение

Одним из важнейших элементов пассажирской канатной дороги является стальной канат, от состояния которого зависит бесперебойная работа дороги и безопасность пассажиров. В [1] определены критерии браковки стальных канатов для подъемных сооружений:

- обрывы наружных проволок;
- поверхностный износ и коррозия;
- разрыв пряди;
- местное уменьшение диаметра каната;
- уменьшение площади поперечного сечения проволок каната (потеря внутреннего сечения);
- деформации (волнистость, корзинообразность, выдавливание проволок, «раздавливание» прядей, перекручивание, перегибы);
- повреждения в результате воздействия высокой температуры или электрического дугового разряда.

Эти же критерии могут использоваться при оценке технического состояния круглопрядных несуще-тяговых и тяговых канатов двойной свивки пассажирских канатных дорог. Критериями браковки несущих канатов закрытой конструкции, эксплуатирующихся на маятниковых пассажирских канатных дорогах, являются:

- обрывы фасонных проволок; износ и коррозия наружных проволок;
- выход из замка одной или нескольких фасонных проволок наружного слоя;
- местное увеличение и уменьшение диаметра каната;
- износ или коррозия наружных фасонных проволок;
- потеря внутреннего сечения;
- деформации;
- температурные воздействия.

При обнаружении дефекта, соответствующего указанной в [2] норме браковки, владелец канатной дороги должен принять

решение либо о проведении ремонта этого каната, либо о его замене.

Дефекты канатов, эксплуатирующихся на грузоподъемных кранах, подъемниках, лифтах и т.д., как и критерии их браковки, описаны в достаточной степени в нормативной и справочной литературе [1-19]. Однако для пассажирской канатной дороги в [2] приведено значительно меньше критериев и норм браковки, чем для подъемных сооружений в [1], хотя требования к безопасности при перевозке пассажиров должны быть более высокими, чем для подъема и перемещения грузов.

Анализ литературных источников, патентный поиск, сопоставление действующих нормативно-технических и правовых документов обосновал необходимость описать причины появления дефектов стальных канатов, эксплуатирующихся на пассажирских канатных дорогах, уточнить некоторые критерии браковки канатов, обосновать способы их контроля и обслуживания.

## 2. Описание дефектов стальных канатов

Обрывы наружных проволок (рис. 1) являются наиболее частыми дефектами несуще-тяговых и тяговых круглопрядных канатов.

Браковка несуще-тяговых и тяговых канатов по числу оборванных проволок проводится согласно [2] в зависимости от конструктивного построения каната (ГОСТ, тип свивки, конструкция, сочетание направления свивки). При этом обрывы проволок подсчитываются на фиксированной длине участков каната, равной 6 или 30 диаметрам каната.

Обрывы наружных проволок обусловлены суммированием переменных изгибных напряжений, вызванных прохождением каната по шкивам и роликам, с напряжениями растяжения и свивочными (возникающими в процессе изготовления прядей и каната в целом). Воздействие переменных напряжений



Рис. 1. Обрывы наружных проволок несущего каната

приводит к усталости металла проволок, образованию макротрещин и обрыву [5, 6]. Усталостное разрушение может возникнуть при напряжениях ниже предела текучести. Особенностью многоциклового усталости является то обстоятельство, что проволока в целом деформируется упруго, но происходит местная повторная упруго-пластическая деформация отдельных кристаллов, неблагоприятно ориентированных по отношению к силовому полю. При достижении критической степени искажения решетки происходит разрыв межатомных связей и полное разрушение проволок (обрыв), которое происходит в зоне многоциклового усталости при нагрузке от  $5 \cdot 10^4$  циклов. Предел выносливости при изгибе  $\sigma_{-1}$  связан с пределом выносливости при растяжении-сжатии  $\sigma_{-1p}$  статистическим соотношением

$$\sigma_{-1} = (1 \dots 1,5) \sigma_{-1p}.$$

При изгибе на шкивах и роликовых балансирах пряди и проволоки контактирующих слоев каната смещаются относительно друг друга, вызывая истирание проволок наружных слоев. На интенсивность износа влияет состояние ручьев шкивов и роликов, кручение каната при перемещении и скорость движения подвижного состава пассажирских канатных дорог. Несмотря на то обстоятельство, что в качестве несущих и тяговых канатов используются оцинкованные канаты марок Ж или ОЖ, в результате механического воздействия и влияния агрессивной внешней среды, наружные проволоки корродируют, что снижет прочность канатов в целом. Согласно [2] для пассажирских канатных дорог при уменьшении диаметра каната в результате износа или коррозии на-

ружных проволок на 7% и более по сравнению с номинальным диаметром, канат подлежит браковке.

Еще одним нормативом браковки каната по наружному износу (и не менее важным) является уменьшение первоначального диаметра наружных проволок в результате износа или коррозии на 40% и более. К сожалению, этот норматив в [2] отсутствует.

Износ наружных проволок при уменьшении диаметра на 40% и более визуально определяется отсутствием цилиндричности смежных изношенных проволок и характерным блеском плоских площадок износа. Для выявления степени поверхностной коррозии участки с наибольшей интенсивностью поражения должны быть очищены, а замеры выполняются аналогично поверхностному износу. В случае, если на канате имеются оборванные проволоки, применяют визуальный-измерительный контроль их диаметра и, соответственно, имеющегося износа или коррозии наружных проволок.

Предлагаем использовать в [2] для пассажирских канатных дорог дополнительную норму браковки канатов по износу 40% и более диаметра наружных проволок, приравнявая число изношенных на 40% проволок к нормативу по обрывам.

Разрыв одной или нескольких прядей являются очень редким дефектом круглопрядных канатов пассажирских канатных дорог. При обнаружении в канате оборванной пряди (рис. 2), канат немедленно бракуется и к дальнейшей работе не допускается.

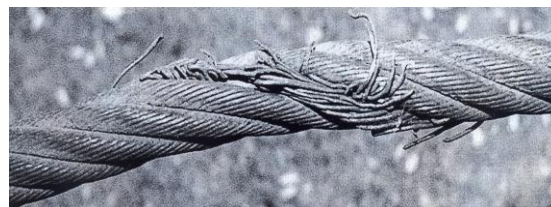


Рис. 2. Разрыв пряди каната

Местное уменьшение диаметра несущих и тяговых канатов, как правило, обусловлено деформацией, разрывом, старением или выдавливанием сердечника, внутренним износом, смятием, раздавливанием проволок внутренних слоев. При местном уменьшении номинального диаметра каната



на 10% несуще-тяговый или тяговый канат согласно [2] бракуется (или подлежит ремонту).

Местное увеличение диаметра канатов может происходить под воздействием влаги и низких температур, когда замерзает разбухший органический сердечник, а также из-за пластических деформаций внутренних слоев каната (рис. 3). Предлагается по аналогии с нормативом по местному уменьшению диаметра каната браковать круглопрядные несуще-тяговые и тяговые канаты пассажирских канатных дорог, а также все канаты, используемые в качестве подъемных, при местном увеличении диаметра каната на 10%. Мало-крутящиеся канаты должны быть забракованы при местном изменении диаметра на 3 %.



Рис. 3. Местное увеличение диаметра каната

В процессе эксплуатации на пассажирских канатных дорогах канаты могут снизить свою первоначальную прочность из-за потери внутреннего металлического сечения, вызванной износом, коррозией, внутренними обрывами, контактным смятием проволок внутренних слоёв. Проверка внутреннего сечения канатов осуществляется магнитной дефектоскопией. Канат бракуется при выявлении потери внутреннего сечения на 10% и более с помощью магнитной дефектоскопии [18].

Канаты с деформационными дефектами подлежат браковке при их обнаружении в процессе эксплуатации пассажирских канатных дорог [2]. Выдавливание проволок является весьма опасным дефектом, характеризующимся смещением избыточных длин проволок под воздействием значительных сил трения скольжения, возникающих при взаимодействии с роликами и воздействием динамических нагрузок (рис. 4).



Рис. 4. Выдавливание проволок

Корзинообразная деформация характеризуется отслоением одной или более смежных наружных прядей многопрядных канатов, связанным с кручением каната и износом ручьев шкивов и балансирных роликов. Раздавливание (сплющивание) каната происходит в результате чисто механического воздействия.

Перекручивание каната происходит под воздействием динамических нагрузок на прослабленную часть каната. Деформации в виде перегиба или залома образуются при значительном изгибе каната в процессе монтажных или ремонтных работ. В результате проволоки получают пластические деформации и пониженную прочность.

Повреждение каната в результате воздействия высоких температур, в том числе электрического дугового разряда или удара молнии, определяют визуально по обгорелой поверхности каната, характерному изменению цвета. При визуальном обнаружении температурного воздействия канат подлежит магнитной дефектоскопии или браковке.

Деформационный дефект «волнистость» является наиболее опасным дефектом и может появиться как по длине, так и на месте счалки несуще-тягового или тягового каната [22]. Канат может внезапно выйти из строя за счет снижения несущей способности. Дефект возникает вследствие неодинаковых перемещений (деформаций) проволок и прядей, обусловленных различиями в длине и механических характеристиках винтовых элементов, расположенных в пределах одного слоя. Прядь большей длины под действием растяжения меньше нагружена, а меньшей длины – более нагружена. Это приводит к тому, что прямолинейный канат принимает форму винтовой спирали. Конструкция каната с органическим сердечником позволяет «лишнюю длину» пряди компенсировать вдавливанием её в сердечник. В канатах с полимерным сердечником из-за значительной поперечной жесткости материала этого не происходит – формируется устойчивая волнистость (рис. 5).

Стальной канат представляет собой сложную механическую систему, у которой при изгибе на шкивах, происходит взаимное



Рис. 5. Волнистость несущего-тягового каната

перемещение прядей и проволок путем их относительного скольжения и перекатывания. Отсутствие смазки приводит к ограничению подвижности проволок и прядей и, как следствие, изменению тангенциального зазора между прядями, последующему силовому перераспределению растягивающей нагрузки между ними. Силовое перераспределение растягивающей нагрузки между прядями при эксплуатации характеризуется образованием дефекта в виде волнистости, механизм образования которого, в том числе, является «закусывание» одной из прядей другими смежными прядями в процессе эксплуатации.

Процесс образования дефекта волнистости характеризуется относительным кручением стального каната вокруг своей оси. Параметрами волнистости являются шаг  $H_в$ , направление и диаметр волнистости  $d_в$  (рис. 6).

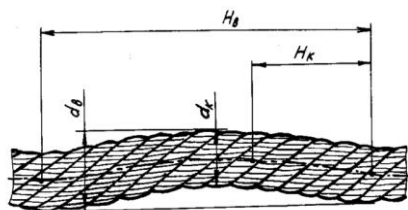


Рис. 6. Параметры волнистости несущего-тягового каната ( $H_к$  - шаг свивки;  $d_к$  - диаметр каната)

Наиболее опасным является совпадение направления свивки каната с направлением волнистости и равенство  $H_в=H_к$ . В этом случае канат бракуется при  $d_в > 1,08d$ . При несовпадении указанных условий канат подлежит браковке при  $d_в > 1,33d$ .

В связи с имеющимися фактами появления дефекта волнистости на канатах (несущего-тяговых, тяговых, несущих [7-9]) считаем целесообразным внести этот дефект в качестве критерия, а вышеприведенное условие – нормативом браковки канатов по волнисто-

сти в раздел «Канаты» пассажирских канатных дорог [2].

Необходимо отметить, что в ФНП по подъемным сооружениям [1], несмотря на достаточно полное описание в п. 270 критериев и норм браковки, в разделе «Требования к браковке стальных канатов» отсутствует норматив браковки по местному увеличению диаметра каната на 10%, а такие дефекты встречаются в процессе эксплуатации канатов на грузоподъемных кранах, подъемниках и др. В связи с этим считаем необходимым внести такой норматив в указанный раздел. Кроме этого, в разделе «Требования к браковке канатных и цепных стропов, а также текстильных стропов на полимерной основе» (п.п. 271, 274) [1] в качестве критериев браковки канатных стропов указаны обрывы наружных проволок, а также трещины, износ, остаточные деформации, повреждение резьбовых соединений металлических элементов стропов. В то же время, в процессе эксплуатации канатные стропы подвержены всем дефектам, указанным в разделе по браковке стальных канатов. Поэтому предлагаем п.271 дополнить фразой: «...а также при обнаружении дефектов, соответствующих нормам браковки, указанным в п.270».

На пассажирских канатных дорогах в качестве несущих применяются канаты закрытой конструкции, к эксплуатационным и технологическим преимуществам которых относятся:

- высокий коэффициент заполнения поперечного сечения (до 0,91);
- гладкая наружная поверхность, способствующая снижению удельного давления между канатом и опорным башмаком, что приводит к уменьшению износа наружных проволок;
- плотная структура каната, образованная фасонными наружными проволоками, которая препятствует проникновению влаги внутрь и коррозионным процессам.

На рис. 7 показаны поперечные сечения несущих канатов закрытой конструкции, соответственно, с Z-, 8-и  $\Omega$ -образными проволоками в наружном слое.

Основной причиной браковки несущих канатов закрытой конструкции являются об-

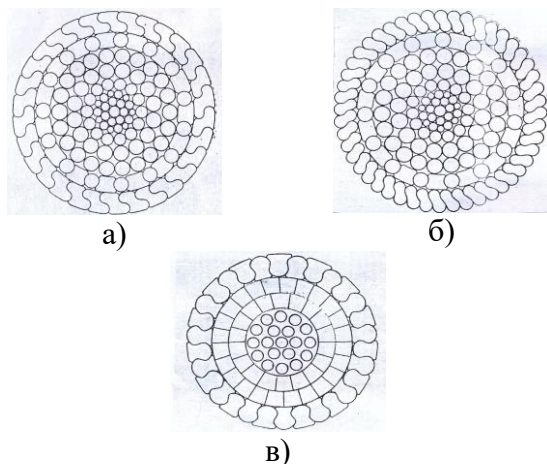


Рис. 7. Поперечное сечение несущих канатов закрытой конструкции: а – Z-образная проволока в наружном слое; б – 8-образная проволока; в –  $\Omega$ -образная проволока

рывы наружных Z-образных проволок (рис. 8). Из-за этого дефекта отбраковываются не менее 80% несущих канатов [9].



Рис. 8. Обрыв фасонной проволоки несущего каната закрытой конструкции

Дефект в виде обрыва фасонных проволок объясняется усталостными процессами при неравномерном нагружении винтовых элементов наружного слоя в процессе эксплуатации. Несущие канаты подлежат замене по обрывам наружных проволок для пассажирских канатных дорог в следующих случаях [2]:

- на участке  $6d$  имеются обрывы двух и более смежных (соседних) проволок наружного слоя;

- на участке  $30d$  оборвано 16,6% (одна шестая часть) фасонных проволок наружного слоя;

- конец оборванной проволоки выступает.

В связи с неопределенностью значения норматива в последней фразе её предлагается продолжить: «... на величину 5 мм и бо-

лее от поперечного контура каната». В этом случае выступающая проволока будет препятствовать прохождению ходовых колёс вагона.

Износ наружных фасонных проволок несущего каната происходит за счёт трения и удельного давления в местах соприкосновения каната с колесами вагона и опорными башмаками пассажирских канатных дорог. Согласно [2] при износе наружной проволоки на 50% ее высоты и более канат закрытой конструкции следует браковать. Считаем, что норма браковки, соответствующая износу наружной фасонной проволоки, равному 50% её высоты, приводит к тому, что изношенная до такого состояния проволока (или несколько смежных проволок) может выйти из замка еще до указанного износа. Предлагается ужесточить эту норму – браковать несущий канат при обнаружении износа, равного 40% высоты наружной проволоки.



Рис. 9. Выход из замка наружных проволок несущего каната

Дефект несущих канатов в виде выхода из замка одной или более проволок наружного слоя без ее обрыва встречается на пассажирских канатных дорогах редко, однако при его обнаружении канат должен подвергаться ремонту или браковаться (рис. 9). Несущие канаты закрытой конструкции, как правило, изготавливаются в малокрутящемся исполнении – слои проволок свиваются в различных направлениях, при этом крутящие моменты, возникающие в слоях одного направления должны уравниваться моментами в слоях противоположного направления, что не всегда удается выполнить технологически. Кроме этого, при движении вагона под воздействием его веса происходит проскальзывание несущего каната относительно башмаков линейных опор и канат оказывается нагруженным продольными силами сопротивления, сосредоточенно при-

ложенными на отдельных участках каната, приводящими к его кручению [8]. Направление кручения определяет характер изменения нагрузки. При раскручивании наружного слоя напряжения растяжения в его проволоках уменьшаются, в то же время внутренние слои закручиваются и напряжения в них, соответственно, возрастают. С появлением радиального зазора между слоями это приводит к выходу из замка одной или более наружных проволок, а при дальнейшей эксплуатации – к расслоению (рис. 10).



Рис. 10. Расслоение (отслоение проволок наружного слоя) несущего каната закрытой конструкции

При закручивании наружного слоя проволок и раскручивании нижележащего слоя канат работает в благоприятных условиях. Динамические нагрузки при эксплуатации пассажирских канатных дорог, неодинаковые характеристики профиля и механические свойства проволок по длине, изгиб каната на башмаках опор способствуют появлению в отдельных проволоках перегруженных внутренних слоев «лишней длины», которая находит себе выход в виде выпучивания (рис. 11).



Рис. 11. Выдавливание (выпучивание) проволок нижележащего слоя несущего каната

При обнаружении на несущем канате пассажирских канатных дорог таких дефектов, как расслоение или выдавливание проволок внутренних слоев (выпучивание), канат необходимо браковать.

Структурный дефект «волнистость» (рис. 12) является причиной снятия с эксплуатации 4% от общего числа обследованных несущих канатов маятниковых пассажирских канатных дорог. Механизм образования этого дефекта на несущих канатах закрытой конструкции аналогичен круглопрядным – невозможность обеспечения равенства геометрических параметров и механических характеристик винтовых элементов до длине при изготовлении канатов. Закрытый канат необходимо браковать при параметрах волнистости, указанных для круглопрядных канатов.

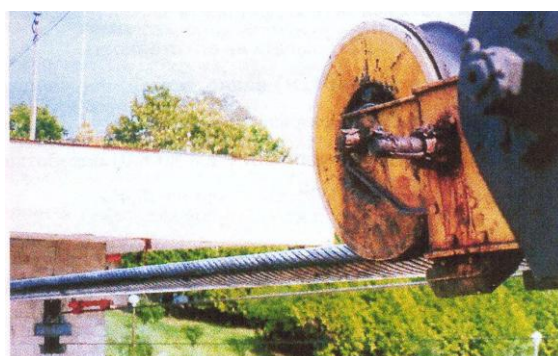


Рис. 12. Волнистость в несущем закрытом канате маятниковой пассажирской канатной дороги

Нормативы по остальным дефектам несущих канатов – местное уменьшение и увеличение диаметра каната, деформации, температурное воздействие – идентичны нормам браковки круглопрядных канатов. На рис. 13 представлен дефект «местное увеличение диаметра каната», образовавшийся в результате перегрузки проволок внутренних слоев несущего каната.



Рис. 13. Дефект несущего каната закрытой конструкции – местное увеличение диаметра каната

### 3. Аналитическое обоснование возникновения дефектов на пассажирских канатных дорогах из-за пластических деформаций канатной проволоки

Прочностные расчеты проволок канатов обычно проводят по допускаемым напряжениям или несущей способности. При расчете по допускаемому напряжению за опасное состояние принимают такое, при котором в наиболее напряженном крайнем волокне проволоки нормальные напряжения достигают значения предела текучести.

Изгибающий момент в поперечном сечении каждой проволоки, соответствующий появлению пластических деформаций:

$$M_T = \sigma_T W_H, \quad (1)$$

где  $W_H$  – момент сопротивления поперечного сечения проволоки при изгибе;  $\sigma_T$  – предел текучести материала проволоки.

Расчет по несущей способности производится по нормальным напряжениям без учета упрочнения материала проволок от пластических деформаций. Для получения выражения допускаемого изгибающего момента  $M_{\max}$  в уравнение (1) введем коэффициент запаса прочности  $Z_p = \sigma_T / [\sigma]$ ;  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение в проволоках каната. Тогда

$$M_{\max} = [\sigma] W_H. \quad (2)$$

При расчете по несущей способности за опасное состояние проволоки принимаем состояние, при котором во всех точках опасного сечения нормальные напряжения достигают значения предела текучести. Тогда изгибающий момент в поперечном сечении каждой проволоки каната определится выражением

$$M_H = 2\sigma_T S_T, \quad (3)$$

где  $S_T$  – статический момент половины площади поперечного сечения проволоки относительно центральной оси ( $S_T = 2r^3/3$ ).

Введя в (3) коэффициент запаса прочности, получим выражение допустимого изгибающего момента:

$$M_{\max}^H = 2[\sigma] S_T. \quad (4)$$

Разделив выражение (4) на (2), получим:

$$M_{\max}^H / M_{\max} = 2S_T / W_H \approx 1,7. \quad (5)$$

Можно сделать вывод, что при одинаковых коэффициентах запаса прочности значение допускаемого изгибающего момента  $M_{\max}^H$  при расчетах по несущей способности в 1,7 раза превышает значение величины изгибающего момента  $M_{\max}$ , полученной расчетом по допускаемым напряжениям.

Величина растягивающих напряжений определяется выражением

$$\sigma_P = \sigma_T / Z_P. \quad (6)$$

Для стали Ст. 45  $\sigma_T = 970$  МПа, поэтому минимальный запас прочности  $Z_P$  для тяговых канатов пассажирских канатных дорог должен соответствовать значению в зависимости от типа дороги - от 3,8 до 4,5; для несуще-тяговых канатов принимается равным 4; для несущих канатов – от 2,7 до 3,15 [1].

Дефекты, связанные с пластическими деформациями канатной проволоки (выдавливание, выпучивание проволок, прядей, перекручивание, перегибы, заломы, обрывы прядей, корзинообразность, расслоение проволок и прядей), могут образовываться при превышении в процессе эксплуатации значений указанных в расчете параметров.

### 4. Организация контроля технического состояния канатов на пассажирских канатных дорогах

Контроль состояния канатов на пассажирских канатных дорогах проводит ремонтная служба (слесари-обходчики) под руководством ответственного за исправное состояние и безопасную эксплуатацию при осмотре, обслуживании и ремонте канатов. В настоящее время Советом по профессиональным квалификациям в лифтовой отрасли, сфере подъемных сооружений и вертикального транспорта подготовлен проект профессионального стандарта «Специалист по ремонту и обслуживанию стальных канатов канатных дорог и фуникулеров».

В процесс обслуживания входит ежедневный осмотр, профилактические работы (очистка, смазка, выравнивание роликов и роликовых балансиров, замена поврежденных бандажей и футеровок и др.), а также ежемесячные и ежегодные ревизии канатов

[2, 10, 11]. Особое внимание при обслуживании должно уделяться контролю участков счалки канатов, на которых производят дополнительную смазку согласно руководству по эксплуатации пассажирских канатных дорог. Вопросы смазки стальных канатов для пассажирских канатных дорог в [2] отсутствуют. Данный вид работ при техническом периодическом обслуживании канатов очень важен и отражен в соответствующих Европейских нормах [23, 24].

В п.560 [2] указано, что регламентные работы при эксплуатации пассажирских канатных дорог и ее элементов следует производить в соответствии с руководством по эксплуатации. Руководством по эксплуатации пассажирских канатных дорог и инструкцией по эксплуатации каната установлено, что в процессе эксплуатации необходимо производить его ревизию и профилактику путем периодического нанесения специального защитного и смазывающего средства на сам канат и его счалку. Результаты ревизии каната должны регистрироваться в письменном виде и храниться весь период эксплуатации.

Средство для смазки должно быть специальным и наноситься самотеком либо пульверизатором. [23, 24].

Для ежегодного контроля фактического состояния согласно требованиям [2] канаты должны подвергаться магнитной дефектоскопии. В процессе дефектоскопии по всей длине каната проводится оценка потери внутреннего сечения, вызванного износом, коррозией, обрывами, контактным смятием проволок внутренних слоёв канатов.

Периодичность дефектоскопического контроля канатов, осуществляемого аттестованными специалистами – первично после монтажа на пассажирских канатных дорогах, затем каждые три года в течение пятнадцати лет эксплуатации, а далее ежегодно. Дефектоскопия осуществляется перемещением каната со скоростью 0,5...1,0 м/с относительно магнитной головки, установленной в зоне контроля каната. Информация по результатам загружается в персональный компьютер для обработки в виде дефектограмм и подготовки отчета. Отчет по дефектоскопии хранится в паспорте пассажирской канатной дороги для

сравнения с результатами предыдущей и последующей дефектограммами [18].

Во время ежедневного осмотра слесарь-обходчик выполняет объезд (обход) дороги и проводит общий осмотр трассы пассажирской канатной дороги. При этом он выполняет проверку правильности положения каната на шкивах и роликах балансиров и прохождения по ним, проводит визуальный осмотр каната, обращая внимание на наличие дефектов, в том числе и на участках счалки.

В ходе ревизии персонал осуществляет контроль каната и креплений его концов. Так, визуально-измерительный контроль каната производится на ревизионной скорости (до 0,5 м/с) в освещенном месте с применением зеркала (рис. 14) с многократным замером диаметра каната на различных его участках и в зоне счалки.



Рис. 14. Проверка каната с использованием зеркала при визуально-измерительном контроле

Кручение несущего каната при эксплуатации пассажирской канатной дороги является одним из факторов, снижающих его качество [20]. Заводы-изготовители в процессе свивки наносят горизонтальную сплошную линию на наружную поверхность прядей по длине каната (как правило, синего цвета) для контроля кручения при счалке (линия должна быть непрерывной и прямолинейной), а также для оценки влияния эксплуатационных факторов (отклонений от прямолинейности, износа футеровки, смещения балансиров и пр.) под нагрузкой (рис. 15).

В процессе монтажа каната и при счалке его концов непрерывная полоса должна быть прямолинейной (не закрученной вокруг оси стального каната). В процессе эксплуатации,

положение полосы является одним из критериев визуального контроля стального несуще-тягового каната на предмет возникновения волнистости.



Рис. 15. Сплошная горизонтальная линия для контроля осевого кручения несуще-тягового каната

Необходимо отметить, что как визуально-измерительный, так и инструментальный методы контроля канатов продолжительны по времени и не всегда качественно оценивают наличие дефектов, которые могут способствовать возникновению аварийного состояния дороги, т.к. зависят от человеческого фактора, которому присущи ошибки, связанные с физиологическими возможностями глаза и чувствительностью магнитного датчика.

Анализ литературных источников [4-18, 22-24] и патентный поиск [19, 20] показали, что за последние годы исследования в этой области направлены на выявление дефектов канатов на пассажирской канатной дороге с использованием метода магнитоскопии. Однако данный метод не позволяет обнаружить такие дефекты каната, как волнистость, кручение, поражение электрическим током и др., которые являются, на наш взгляд, более опасными с точки зрения внезапной потери несущей способности.

Новым этапом в повышении безопасности пассажирских канатных дорог является непрерывный мониторинг технического состояния стального каната в процессе его экс-

плуатации по интегральным показателям, охватывающий все известные критерии браковки, в реальном режиме времени с использованием современных цифровых информационных технологий, в том числе, компьютерного зрения, искусственного интеллекта и технологий интернета вещей [21].

## 5. Выводы

1. Анализ литературных источников, патентный поиск, сопоставление действующих нормативно-технических и правовых документов в отношении критериев, норм браковки и дефектов канатов пассажирских канатных дорог показал, что существующие в [2] нормы браковки не в полной мере соответствуют известным дефектам, возникающим на стальных канатах, в связи с чем, предлагается дополнить раздел «Канаты» следующими нормативами:

- для несуще-тяговых и тяговых канатов: износ и коррозия 40% диаметра наружных проволок;

- для несуще-тяговых, тяговых и несущих канатов: дефект «волнистость» с её характеристиками;

- местное увеличение диаметра каната на 10%;

- для несущих канатов: износ наружной фасонной проволоки на 40% ее высоты;

- несущие канаты подлежат замене по обрывам наружных проволок если конец оборванной проволоки выступает на длину более 5 мм от поперечного контура каната);

В раздел «Требования к браковке стальных канатов подъемных сооружений» [1] ввести критерий браковки:

- местное увеличение диаметра каната на 10%;

2. Использовать системы дистанционного контроля непрерывного мониторинга технического состояния стального каната в процессе эксплуатации по интегральным показателям, охватывающие все известные критерии браковки, в реальном режиме времени с использованием современных цифровых информационных технологий, в том числе, компьютерного зрения, искусственного интеллекта и интернета вещей.

3. Несущие-тяговые канаты должны иметь сплошную полосу на поверхности каната для визуального контроля счаливания концов, не допускать его поворот вокруг собственной оси, и визуального контроля зарождения дефекта волнистости.

4. Рекомендовать для несущие-тяговых канатов при достижении: 20...25% от допустимых циклов, установленных заводами-

изготовителями, проводить обследование участка счалки с проверкой диаметра замков; 35-40% от допустимых циклов - произвести перемещение замков счалки путём укорочения каната.

5. Установить периодичность нанесения смазки на несущие-тяговых канатов при эксплуатации: для каната в целом – один год; для участка счалки – не реже двух месяцев.

### Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения». Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 26.11.2020 г. № 461.

2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности пассажирских канатных дорог и фуникулеров». Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13.11.2020 г. № 441.

3. РД РОСЭК 012-97. Канаты стальные. Контроль и нормы браковки. 1997. 52 с.

4. Хальфин М.Н., Короткий А.А., Иванов Б.Ф., Папирняк В.П. Крановые канаты. Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И.Платова, 2015. 127 с.

5. Иванов Б.Ф., Хальфин М.Н., Логвинов А.С., Власов Д.В. Об ускоренных испытаниях канатной проволоки // Подъемно-транспортные и строительные системы: наука и инновации: межвуз. сборник науч. трудов / Южно-Российский государственный политехнический ун-т (НПИ) имени М.И. Платова. Новочеркасск: Лик, 2015. С. 101-105.

6. Короткий А.А., Иванов Б.Ф., Хальфин М.Н., Егельская Е.В., Каланчуков И.А. Методика проведения ускоренных усталостных испытаний канатной проволоки // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С.181-186.

### References

1. Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh obektov, na kotorykh ispolzuyutsya podemnye sooruzheniya». Utv. prikazom Federalnoy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru 26.11.2020 № 461 (In Russian)

2. Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Pravila bezopasnosti passazhirskikh kanatnykh dorog i funikulerov». Utv. prikazom Federalnoy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru 13.11.2020 № 441 (In Russian)

3. RD ROSEK 012-97. Kanaty stalnye. Kontrol i normy brakovki. 52 p (In Russian)

4. Halfin M.N., Korotkij A.A., Ivanov B.F., Papirnyak V.P. Kranovye kanaty. Novocherkassk, 2015. 127 p. (In Russian)

5. Ivanov B.F., Halfin M.N., Logvinov A.S., Vlasov D.V. Ob uskorennykh ispytaniyakh kanatnoy provoloki. Podemno-transportnye i stroitelnye sistemy: nauka i innovacii: mezhvuz. sbornik nauch. trudov. Novocherkassk, Lik, 2015. Pp. 101-105 (In Russian)

6. Korotkij A.A., Ivanov B.F., Halfin M.N., Egel'skaya E.V., Kalanchukov I.A. Metodika provedeniya uskorennykh ustalostnykh ispytaniy kanatnoj provoloki. Nauchno-tehnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta, 2019, No. 2, pp. 181-186 (In Russian)

7. Kortkij A.A., Panfilov A.V., Marchenko E.V. Stoykost nesushche-tyagovogo kanata passa-zhirskoj podvesnoj kanatnoj dorogi. Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki, 2018, No. 2, pp. 66-70/ (In Russian)



7. Корткий А.А., Панфилов А.В., Марченко Э.В. Стойкость несущего каната пассажирской подвесной канатной дороги // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. № 2(198). С. 66-70.
8. Короткий А.А., Марченко Э.В., Панфилов А.В. Технические причины обрывов проволок несущего каната на пассажирской подвесной канатной дороге // Безопасность техногенных и природных систем. 2017. № 1. С. 18-25.
9. Хальфин М.Н., Сорокина Е.В., Иванов Б.Ф. Кручение и волнистость несущих закрытых канатов подвесных канатных дорог. Новочеркасск: Набла, 2004. 117 с.
10. Короткий А.А., Иванов Б.Ф., Панфилов А.В., Егельская Е.В. Оценка квалификаций персонала наземных транспортно-технологических машин и комплексов по промышленной безопасности. Ростов на Дону: ДГТУ, 2019. 175 с.
11. Логвинов А.С., Короткий А.А. Пассажирские одноканатные дороги. Устройство и эксплуатация. Ростов на Дону: ДГТУ, 2016. 210 с.
12. Lei Peng, Zhi-Qiang Feng, Pierre Joli, Jian-hua Liu, Yang-jing Zhou. Automatic contact detection between rope fibers // *Computers and Structures*. 2019. №218. P. 82–93. DOI: 10.1016/j.compstruc.2019.03.010.
13. Shiwei Liu, Yanhua Sun, Xiaoyuan Jiang, Yihua K. Comparison and analysis of multiple signal processing methods in steel wire rope defect detection by hall sensor // *Measurement*. 2021. Vol.171. 108768. DOI:10.1016/j.measurement.2020.108768
14. Yongbo Guo, Dekun Zhang, Xuehui Yang, Cunao Feng, Shirong Ge. Experimental research on effect of wire rope transverse vibration on friction transmission stability in a friction hoisting system // *Tribology International*. 2017. Vol. 115. P. 233–245. DOI: 10.1016/j.triboint .2017.05.033.
15. Yanchun Ni, Qiwei Zhang, Rongya Xin. Magnetic flux detection and identification of bridge cable metal area loss damage // *Measurement*. 2021. Vol. 167. 108443. DOI:10.1016/j.measurement .2020.108443
16. Collinia L., Degasperib F. MRT detection of fretting fatigue cracks in a cableway locked coil rope. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 2014, No. 2, pp. 64–70. DOI:10.1016/j.csndt .2014.09.001.
17. Neslušana M., Bahleda F., Minárik P., Zgútová K., Jambor M. Non-destructive monitoring of bridge cable metal area loss damage. *Measurement*, 2021, Vol. 167. 108443. DOI: 10.1016/j.measurement .2020.108443.
8. Korotkij A.A., Marchenko E.V., Panfilov A.V. Tekhnicheskie prichiny obryvov provolok nesushche-tyagovogo kanata na passazhirskoj podvesnoj kanatnoj doroge. *Bezopasnost tekhnno-gennyh i prirodnyh sistem*, 2017, No. 1, pp. 18-25. (In Russian)
9. Halfin, M.N. *Kruchenie i volnistost nesushchih zakrytykh kanatov podvesnykh kanat-nykh dorog*. Novoчеркасск, Nabla, 2004. 117 p. (In Russian)
10. Korotkij A.A., Ivanov B.F., Panfilov A.V., Egel'skaya E.V. *Otsenka kvalifikatsiy personala nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh mashin i kompleksov po promyshlennoj bezopasnosti*. Rostov on Don, DGTU, 2019. 175 p (In Russian)
11. Logvinov A.S., Korotkij A.A. *Passazhirskie odnokanatnye dorogi. Ustrojstvo i ekspluatatsiya*. Rostov on Don, DGTU, 2016. 210 p. (In Russian)
12. Lei Peng, Zhi-Qiang Feng, Pierre Joli, Jian-hua Liu, Yang-jing Zhou Automatic contact detection between rope fibers. *Computers and Structures*, 2019, Vol.218, pp. 82–93 DOI: 10.1016/j.compstruc.2019.03.010.
13. Shiwei Liu, Yanhua Sun, Xiaoyuan Jiang, Yihua K. Comparison and analysis of multiple signal processing methods in steel wire rope defect detection by hall sensor. *Measurement*, 2021, Vol.171, 108768, DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108768.
14. Yongbo Guo, Dekun Zhang, Xuehui Yang, Cunao Feng, Shirong Ge. Experimental research on effect of wire rope transverse vibration on friction transmission stability in a friction hoisting system. *Tribology International*, 2017, Vol.115, pp. 233–245. DOI: 10.1016/j.triboint 2017.05.033.
15. Yanchun Ni, Qiwei Zhang, Rongya Xin. Magnetic flux detection and identification of bridge cable metal area loss damage. *Measurement*, 2021, Vol. 167. 108443. DOI: 10.1016/j.measurement .2020.108443.
16. Collinia L., Degasperib F. MRT detection of fretting fatigue cracks in a cableway locked coil rope. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 2014, No. 2, pp. 64–70. DOI:10.1016/j.csndt .2014.09.001.
17. Neslušana M., Bahleda F., Minárik P., Zgútová K., Jambor M. Non-destructive monitoring of bridge cable metal area loss damage. *Measurement*, 2021, Vol. 167. 108443. DOI: 10.1016/j.measurement .2020.108443.

tion of fretting fatigue cracks in a cableway locked coil rope // Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation. 2014. № 2. P. 64–70. DOI:10.1016/j.csnedt.2014.09.001.

17. Neslušana M., Bahleda F., Minárik P., Zgútová K., Jambor M. Non-destructive monitoring of corrosion extent in steel rope wires via Barkhausen noise emission.

18. РД 03-348-00. Методические указания по магнитной дефектоскопии стальных канатов. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 30.03.2000 №11.

19. Патент RU №2489542, МПК D07B 1/00. Канат и способ его дефектоскопии. Опубликовано 10.08.2013.

20. Патент RU №2739815, МПК D07B 1/00. Несущий канат кольцевой подвесной канатной дороги с промежуточными опорами и способ его дефектоскопии. Опубликовано 28.12.2020. Бюл. №1.

21. Постановление Правительства РФ от 31 декабря 2020 г. № 2415 «О проведении эксперимента по внедрению системы дистанционного контроля промышленной безопасности».

22. Korotky A., Ivanov V., Popov S., Marchenko J., Dontsov N. Model of forming vibration mechanochemical solid lubrication coating on surface of steel rope. // XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019, Vol. 403. DOI:10.1088/1755-1315/403/1/012116.

23. EN 12927-7. Подвесные канатные дороги для транспортировки людей. Требования безопасности. Канаты. Часть 7. Проверка, ремонт и технический уход.

24. EN 12385-8. Канаты стальные. Безопасность. Часть 8. Несущие и тяговые канаты из прядей для пассажирской канатной дороги

toring of corrosion extent in steel rope wires via Barkhausen noise emission.

18. RD 03-348-00. Metodicheskie ukazaniya po magnitnoy defektoskopii stalnykh kanatov. Utverzhdeny postanovleniem Gosgortekhnadzora Rossii 30.03.2000 No. 11 (In Russian)

19. Patent RU 2489542, MPK D07V 1/00. Kanat i sposob ego defektoskopii [The discharge device]. Published 10.08.2013. (In Russian)

20. Patent RU 2739815, MPK D07V 1/00. Nesushche-tyagovyy kanat kolcevoy podvesnoy kanatnoy dorogi s promezhutochnymi oporami i sposob ego defektoskopii [The discharge device]. Published 12.2020. (In Russian)

21. Postanovlenie Pravitelstva RF 31.12.2020, No. 2415 «O provedenii eksperimenta po vnedreniyu sistemy distancionnogo kontrolya promyshlennoj bezopasnosti».

22. Korotky A., Ivanov V., Popov S., Marchenko J., Dontsov N. Model of forming vibration mechanochemical solid lubrication coating on surface of steel rope. In: XII International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2019, Vol.403. DOI:10.1088/1755-1315/403/1/012116.

23. EN 12927-7. Podvesnye kanatnye dorogi dlya transportirovki lyudey. Trebovaniya bezopasnosti. Kanaty. Vol. 7. Proverka, remont i tekhnicheskii ukhod.

24. EN 12385-8. Kanaty stalnye. Bezopasnost. Vol. 8. Nesushchie i tyagovye kanaty iz pryadey dlya passazhirskoy kanatnoy dorogi».

УДК (UDC) 621.86

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ ТРАНСМИССИИ  
ПЕРСПЕКТИВНОГО ШАССИ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ МОБИЛЬНОГО  
ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕГРУЗОЧНОГО КАНАТНОГО КОМПЛЕКСАTHE MAIN RESULTS OF THE DEVELOPMENT OF THE TRANSMISSION  
A PROMISING CHASSIS FOR THE PLACEMENT OF A MOBILE  
TRANSPORT AND OVERLOADING ROPE COMPLEXТаричко В.И.<sup>1</sup>, Перминова Д.И.<sup>2</sup>  
Tarichko V.I.<sup>1</sup>, Perminova D.I.<sup>2</sup><sup>1</sup> – АО «Брянский автомобильный завод» (Брянск, Россия)<sup>2</sup> – Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)<sup>1</sup> – Bryansk Automobile Plant JSC (Bryansk, Russian Federation)<sup>2</sup> – Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** В статье представлены результаты разработки шасси для размещения транспортно-технологических машин, оснащенные трансмиссией с возможностью отбора большой мощности (по отношению к мощности штатного ходового двигателя). На основе анализа рынка и рекламных кампаний ведущих производителей грузовых автомобилей и колесных шасси сделан вывод о конкурентных преимуществах шасси с большим отбором мощности. Приведена подробная схема разработанной трансмиссии. Представлена математическая модель для исследования динамических рабочих процессов в трансмиссии при использовании шасси для размещения базовых станций мобильных транспортно-перезрузочных канатных комплексов (мобильных канатных дорог).

**Ключевые слова:** мобильная канатная дорога, базовая станция, шасси, трансмиссия, отбор мощности, динамика, моделирование.

**Дата принятия к публикации:** 25.01.2021  
**Дата публикации:** 25.03.2021

**Сведения об авторах:**

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

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

**Abstract.** The article presents the results of the development of a chassis for the placement of transport and technological machines equipped with a transmission with the possibility of taking off high power (in relation to the power of the standard running engine). Based on the analysis of the market and advertising campaigns of the leading manufacturers of trucks and wheel chassis, a conclusion is made about the competitive advantages of a chassis with a large selection of power. A detailed diagram of the developed transmission is given. A mathematical model is presented for the study of dynamic working processes in the transmission when using the chassis for the placement of base stations of mobile transport and reloading rope complexes (mobile cable cars).

**Keywords:** mobile ropeway, base station, chassis, transmission, power take-off, dynamics, simulation.

**Date of acceptance for publication:** 25.01.2021  
**Date of publication:** 25.03.2021

**Authors' information:**

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

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

**Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-422.2020.8

**Acknowledgements**

The study was supported by Presidential Grant for Governmental Support to Young Russian Scientists No. №MD-422.2020.8

## 1. Введение

Мобильные транспортно-перегрузочные канатные комплексы на базе различных шасси предназначены для перевозки грузов и пассажиров в сложных условиях. Они могут быть использованы при строительстве объектов нефте- и газотранспортных систем, ликвидации последствий стихийных бедствий, при освоении труднодоступных и арктических земель. Оборудование канатной дороги монтируется на мобильных шасси различной конструкции, как правило, на колесных шасси или грузовых автомобилях. Такие машины называются базовыми станциями мобильных транспортно-технологических канатных комплексов [1-11].

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 [9, 12]. При этом энергетический модуль должен быть оснащен рациональной и надежной системой отбора мощности от двигателя на привод навесного оборудования [12].

## 2. Анализ рынка и рекламных кампаний по продвижению колесных шасси

В ходе исследования выполнен анализ рекламных кампаний ведущих производителей колесных шасси (грузовых автомобилей): КамАЗ, ГАЗ, Урал, МАЗ, БАЗ, MAN, Volvo, Mercedes, ISUZU, Hyundai. Исследование проводилось как на основе расширенного информационного поиска в сети Интернет и социальных сетях, так и с использованием базы знаний АО «Брянский автомобильный завод». Данные работы выполнены в рамках реализации положений, изложенных в работе [13].

Большая часть рекламных и коммуникативных кампаний в предметной области проходит на базе специализированных сайтов, порталов и форумов.

В меньшей степени используются средства SMM-маркетинга, что объясняется достаточно узкой целевой аудиторией, представители которой предпочитают традиционные формы получения рекламной информации (деловые переговоры, специализированные выставки, каталоги оборудования).

Текстовые и видео-блоги в области грузовых автомобилей посвящены непосредственно их эксплуатации и повседневным моментам жизни водителей и не могут служить источником достоверной информации о рынке грузовых автомобилей и колесных шасси.

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% – шестисосного колесного шасси БАЗ-69099.

Для решения этой проблемы необходимо устанавливать дополнительный двигатель, как это делается, например, у миксеров для перевозки бетона. Однако, условия компоновки [14] мачтового оборудования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов с центральным креплением на раме не предполагают размещение дополнительных двигателей. В этом случае требуется обеспечение большего отбора мощности от штатного ходового двигателя.

Таким образом, можно сделать вывод, что наличие возможности отбора большой мощности является важным не только с технической точки зрения [12], но и позволит получить конкурентное преимущество на рынке современных колесных шасси, предназначенных для размещения энергоемкого технологического оборудования, в том числе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов.

В связи с этим, задача создания новых видов трансмиссии колесных шасси является актуальной.

### 3. Конструкция трансмиссии перспективного шасси для размещения мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса

Конструкция трансмиссии перспективного шасси для размещения мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса показана на рис. 1. Она учитывает потребность в отборе большой мощности от штатного ходового двигателя и защищена патентом на изобретение [15].

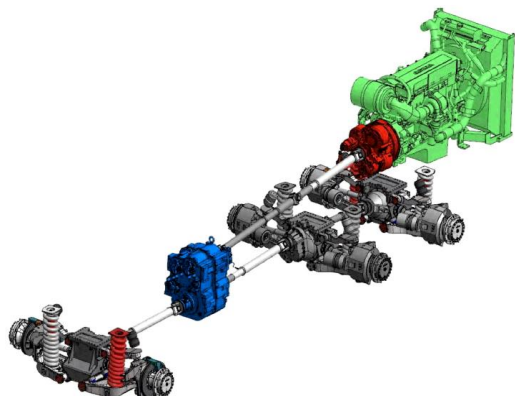


Рис. 1. Трехмерная модель трансмиссии [15]

Трансмиссия (рис. 2), по аналогии с типовыми конструкциями трансмиссий грузовых автомобилей [16], содержит коробку передач 3; раздаточную коробку 4; карданную передачу 5; карданные валы 6, 7, 8; редуктор 9 переднего моста и два редуктора 10 задних мостов [15].

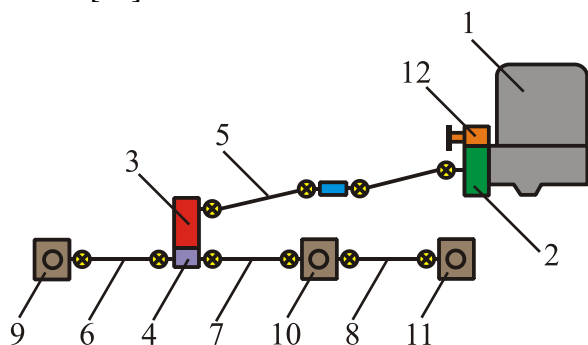


Рис. 2. Структурная схема трансмиссии [15]:

- 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

Разработанная конструкция трансмиссии отличается следующими техническими особенностями [15]:

- коробка передач 3 представляет собой автоматическую коробку передач и объединена с раздаточной коробкой 4 единым корпусом, размещенным в средней части автомобиля;

- вторичный вал раздаточной коробки соединен с редукторами переднего и заднего мостов посредством карданных валов 6, 7, 8;

- двигатель 1 дополнительно содержит установленный на картере маховика гидротрансформатор 2, передающий крутящий момент от двигателя посредством выходного вала через карданную передачу на первичный вал коробки передач 4, а также коробку отбора мощности 12, для передачи мощности технологическому оборудованию, образующие вместе единый силовой агрегат;

- возможна установка двигателя в передней или задней части рамы, в зависимости от компоновки оборудования мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса;

- трансмиссия обеспечивает возможность отбора до 70% мощности двигателя для привода технологического оборудования, в том числе, для привода канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса [15].

### 4. Методика исследования рабочих процессов трансмиссии при эксплуатации мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса

Для исследования рабочих процессов трансмиссии использовались подходы, подробно рассмотренные в работах [17-21]. Источник энергии (двигатель) моделировался с помощью силовых характеристик а механическая часть трансмиссии представлялась в виде совокупности инерционных элементов, соединенных упругими и диссипативными связями [17].

Однако наличие гидротрансформатора и автоматической коробки передач потребовало разработки дополнительных математиче-

ских моделей, учитывающих особенности работы этих узлов. Также учитывалось распределение мощности между потребителями (мостами и нагрузкой на отборе).

В общем виде математическая модель для исследования динамических процессов в разрабатываемой трансмиссии выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} J_0 \ddot{\varphi}_0 + c_{01} \left( \varphi_0 - \frac{\varphi_1}{i_{01}} \right) + \alpha_{01} \left( \dot{\varphi}_0 - \frac{\dot{\varphi}_1}{i_{01}} \right) = M_{D0}; \\ J_1 \ddot{\varphi}_1 + c_{12} \left( \varphi_1 - \frac{\varphi_2}{i_{12}} \right) + \alpha_{12} \left( \dot{\varphi}_1 - \frac{\dot{\varphi}_2}{i_{12}} \right) - \frac{c_{01}}{i_{01}} \left( \varphi_0 - \frac{\varphi_1}{i_{01}} \right) - \frac{\alpha_{01}}{i_{01}} \left( \dot{\varphi}_0 - \frac{\dot{\varphi}_1}{i_{01}} \right) = 0; \\ \dots \\ J_i \ddot{\varphi}_i + c_{i+1} \left( \varphi_i - \frac{\varphi_{i+1}}{i_{i+1}} \right) + \alpha_{i+1} \left( \dot{\varphi}_i - \frac{\dot{\varphi}_{i+1}}{i_{i+1}} \right) - \frac{c_{i-1i}}{i_{i-1i}} \left( \varphi_{i-1} - \frac{\varphi_i}{i_{i-1i}} \right) - \frac{\alpha_{i-1i}}{i_{i-1i}} \left( \dot{\varphi}_{i-1} - \frac{\dot{\varphi}_i}{i_{i-1i}} \right) = 0; \\ \dots \\ J_N \ddot{\varphi}_N - \frac{c_{N-1N}}{i_{N-1N}} \left( \varphi_{N-1} - \frac{\varphi_N}{i_{N-1N}} \right) - \frac{\alpha_{N-1N}}{i_{N-1N}} \left( \dot{\varphi}_{N-1} - \frac{\dot{\varphi}_N}{i_{N-1N}} \right) = -M_S, \end{cases}$$

где  $i=0\dots N$  – порядковый номер элемента трансмиссии (от двигателя к движителям или навесному оборудованию);  $J_i$  – момент инерции  $i$ -го элемента трансмиссии, приведенный к его входному валу;  $\varphi_i$  – угол поворота  $i$ -го элемента трансмиссии;  $c_{ij}$  – крутильная жесткость элемента трансмиссии;  $\alpha_{ij}$  – коэффициент диссипации элемента трансмиссии;  $M_{D0}$  – движущий момент, передаваемый от двигателя на входное звено трансмиссии через сцепление;  $M_S$  – момент сопротивления, создаваемый приводимыми в движение исполнительными механизмами или насосами гидравлической части гидромеханической трансмиссии оборудования канатной дороги;  $i_{ij}$  – передаточные значения элементов трансмиссии [17].

Так как схема (рис. 2) предполагает разветвление, то при составлении уравнений движения необходимо учитывать баланс мощностей в виде ряда алгебраических уравнений:

$$P_i = \sum_j P_{i,j},$$

где  $P_i$  – подводимая мощность до разветвления;  $P_{i,j}$  – мощность на  $j$ -й ветви после раз-

ветвления (с учетом коэффициента полезного действия механизма разветвления).

Разветвление кинематической схемы может также приводить к циркуляции мощности, что приводит к перегрузке отдельных элементов трансмиссии.

Влияние гидротрансформатора учитывается с помощью получаемой экспериментально безразмерной характеристики, связывающей моменты на входе и выходе с текущим передаточным отношением.

## 5. Основные выводы

В ходе исследования выполнена разработка шасси для размещения транспортно-технологических машин, оснащенные трансмиссией с возможностью отбора большой мощности (по отношению к мощности штатного ходового двигателя). Данное шасси может использоваться при создании тяжелых мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов.

Проведенный анализ рынка современных колесных шасси показал, что наличие возможности отбора большой мощности является важным не только с технической точки зрения, но и позволяет получить конкурентное преимущество.

## Список литературы

1. Пат. 2337023 Рос. Федерация: МПК7 В61В 7/00. Мобильная подвесная канатная дорога / Короткий А.А., Хальфин М.Н., Маслов В.Б. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ. № 2007102705/11; заявл. 24.01.2007; опубл. 27.10.2008, Бюл. 30.
2. Пат. 2465423 Рос. Федерация: МПК7 E04H 3/14. Стадион / Короткий А.А., Приходько В.М. Кустарев Г.В. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ. № 2011112660/03; заявл. 01.04.2011; опубл. 27.10.2012, Бюл. 30.
3. Лагереv А.В., Таричко В.И., Солдатченков С.П. Обеспечение общей устойчивости базовых колесных станций мобильных канатных дорог // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 210-220. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-210-220>.
4. Лагереv И.А., Таричко В.И., Солдатченков С.П., Игнатов Д.А. Создание экспериментального макета мобильной канатной дороги с использованием 3D-печати // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 221-230. DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-221-230>.
5. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Оптимальное проектирование линий канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2015. Т.1. № 1. С. 57-65.
6. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Короткий А.А., Панфилов А.В. Концепция инновационной системы городского транспорта «Канатное метро города Брянска» // Вестник Брянского государственного технического университета. 2012. №3. С. 12-15. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302025>
7. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Оптимизация шага установки промежуточных опорных конструкций вдоль линии канатного метро // Вестник Брянского государственного университета. 2014. № 4. С. 22-30. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302237>

## References

1. Patent RU 2337023, B61B 7/00. *Mobilnaya podvesnaya kanatnaya doroga* [Mobile ropeway]. Korotkiy A.A., Khalphin M.N., Maslov V.B. Published 27.10.2008. (In Russian)
2. Patent RU 2465423, E04H 3/14. *Stadion* [Stadium]. Korotkiy A.A., Prihodko V.M., Kustarev G.V. Published 27.10.2012. (In Russian)
3. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P. General stability of a base vehicle of a mobile ropeway. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 210-220. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-210-220 (In Russian)
4. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P., Ignatov D.A. The experimental model creation of a mobile ropeway by 3D-printing. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.2, pp. 221-230. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-221-230 (In Russian)
5. 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)
6. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Korotkiy A.A., Panfilov A.V. Innovation transport system "Bryansk rope metro". *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No. 3, pp. 12-15. (In Russian) DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302025>
7. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Cable transport system "Kanatnoe metro" towers distance optimization. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, No.4, pp. 22-30.
8. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V. *Razvitie transportnoy infrastruktury krupnykh gorodov i territoriy na osnove tekhnologii kanatnogo metro* [The development of transport infrastructure of large cities and territories on the basis of technology of passenger ropeways]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2017. 344 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913> (In Russian)
9. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Modeling operation modes of hydraulic

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

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

10. Лагереv И.А., Таричко В.И., Лагереv А.В. Формирование стратегии восстановления канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса в процессе эксплуатации // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 276-293. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293

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

12. 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.

13. Киятина И.И., Лагереv И.А. Формирование компетенций в области современных сквозных цифровых технологий у обучающихся по направлению «Реклама и связи с общественностью» // Ученые записки Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 11-15.

14. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv И.А. Компоновка технологического оборуду-

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)

10. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Lagerev A.V. Formation of the strategy for restoring the rope system of the mobile transport and reloading rope complex during operation. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 276-293. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293 (In Russian)

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

12. 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)

13. Kiyutina I.I., Lagerev I.A. Formation of competencies in the field of modern end-to-end digital technologies for students in the direction of PR. *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 11-15. (In Russian)

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

15. Patent RU 2738871, B60K 17/34. *Transmissiya pozharno-spatelnogo avtomobilya* [Fire Rescue Vehicle Transmission]. Tarichko V.I., Levkovets N.R., Kiselev O.V., Polekhin D.E. 17.12.2020. (In Russian)

16. Tarasik V.P. *Teoriya dvizheniya avtomobilya* [Automobile moving theory]. Sankt-Petersburg, BVKh-Peterburg, 2006. 478



дования на базовом шасси мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №3. С. 388-403. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-388-403

15. Пат. 2738871 Рос. Федерация: МПК<sup>7</sup> 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.

16. Тарасик В.П. Теория движения автомобиля СПб.: БВХ-Петербург, 2006. 478 с.

17. Таричко В.И., Лагереv И.А. Расчетно-экспериментальные исследования динамики механической трансмиссии базовой станции мобильной канатной дороги // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 318-326. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-318-326

18. Имангулов А.Р., Филькин Н.М. Об упрощении динамической модели трансмиссии гибридного легкового автомобиля // Интеллектуальные системы в производстве. 2013. №2. С. 55-57.

19. Лелиовский К.Я., Макаров В.С. Исследование вибраций трансмиссии при движении автомобиля по дорогам различного микропрофиля // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева. 2013. № 4. С. 98-103.

20. Шадрин С.С. Иванов А.М. Идентификация параметров сопротивления движению колесных транспортных средств в эксплуатации // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т.1. №2. С. 248-251.

21. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Оптимальное проектирование линии канатного метро // Вестник Брянского государственного университета. 2015. №2. С. 406-415. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302241>

p. (In Russian)

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

18. Imangulov A.R. About simplification of dynamic model of transmission of the hybrid car. *Intellektualnie sistemy v proizvodstve*, 2013, No.2, pp. 55-57. (In Russian)

19. Leliovskiy K.Ya. Study of transmission vibrations when driving a car on the roads of various microprofiles. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva*, 2013, No.4, pp. 98-103. (In Russian)

20. Shadrin S.S., Ivanov A.M. Identification of parameters of the resistance movement of wheeled vehicles during operation. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2013, Vol.1, No.2, pp. 248-251. (In Russian)

21. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of the cable car line. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, No. 2, pp. 406-415. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302241> (In Russian)

УДК (UDC) 621.86

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

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

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

**Дата принятия к публикации:** 28.01.2021  
**Дата публикации:** 25.03.2021

**Сведения об авторах:**

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

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

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

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

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

**Authors' information:**

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

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

**Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-докторов наук №МД-422.2020.8

**Acknowledgements**

The study was supported by Presidential Grant for Governmental Support to Young Russian Scientists No. №MD-422.2020.8

**1. Введение**

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

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

Известны различные варианты компоновки основного оборудования мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов на базовом шасси. В том числе, существует вариант применения полуприцепа для размещения активной платформы, устанавливаемой во время работы канатной системы на опорную поверхность [14]. При работе канатной дороги полуприцеп не воспринимает внешние нагрузки, действующие со стороны канатной дороги [14, 15].

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

## 2. Конструкция полуприцепа

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

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

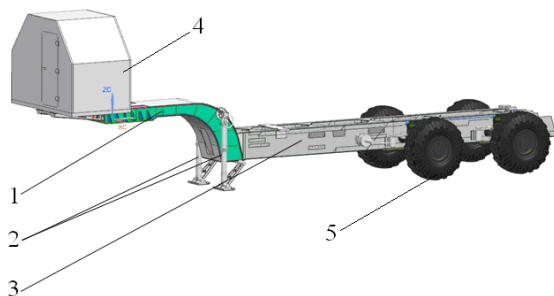


Рис. 1. Геометрическая твердотельная модель полуприцепа: 1 – гусак, 2 – опоры, 3 – рама; 4 – кабина для размещения оборудования управления мобильного транспортно-технологического канатного комплекса; 5 – ходовые колеса

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

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

## 3. Расчетные сочетания нагрузок

В ходе расчета учитывались две группы расчетных режимов:

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

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

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

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

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

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

## 3. Расчетная модель для исследования напряженно-деформированного состояния полуприцепа

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

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

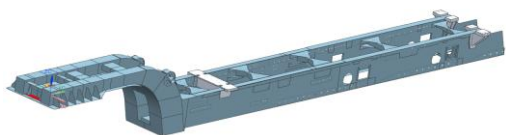


Рис. 2. Идеализированная геометрическая модель полуприцепа

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

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

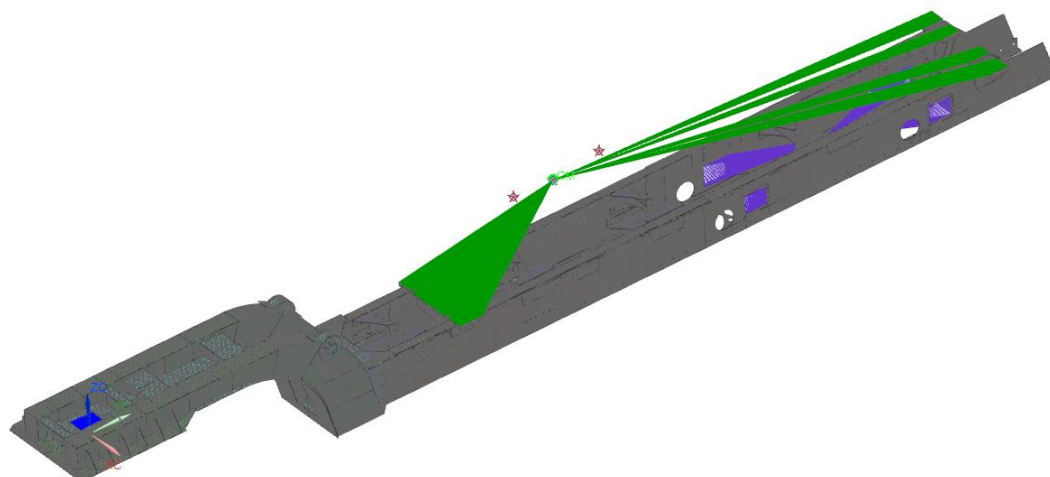


Рис. 3. Расчетная конечноэлементная модель полуприцепа

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

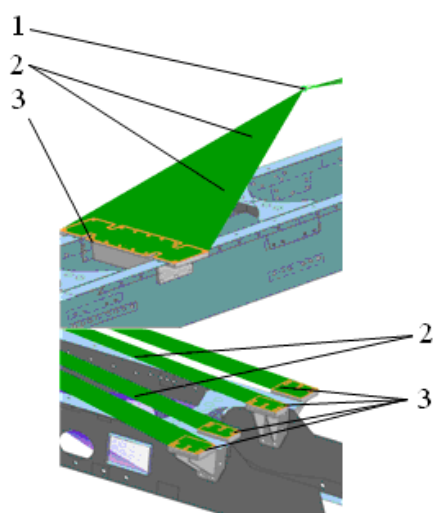


Рис. 4. Моделирование связи кронштейнов и сосредоточенных масс:

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

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

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

Соединение кронштейнов в модели выполнено следующим образом:

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

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

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

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

б)



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

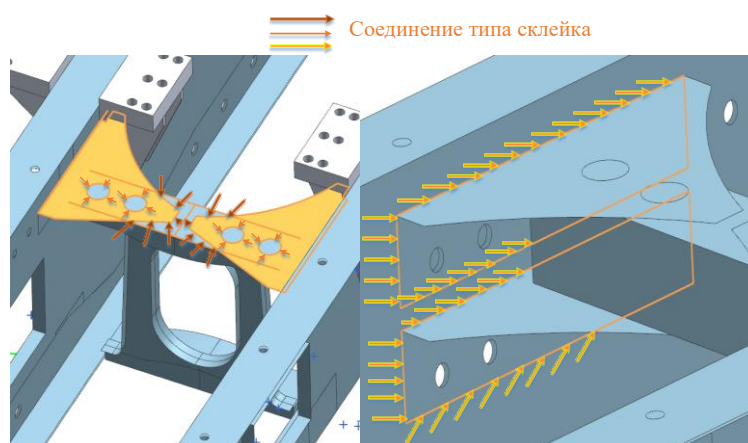


Рис. 6. Моделирование сварных швов в конструкции лонжеронов

Результат построения конечноэлементной модели полуприцепа показан на рис. 7.

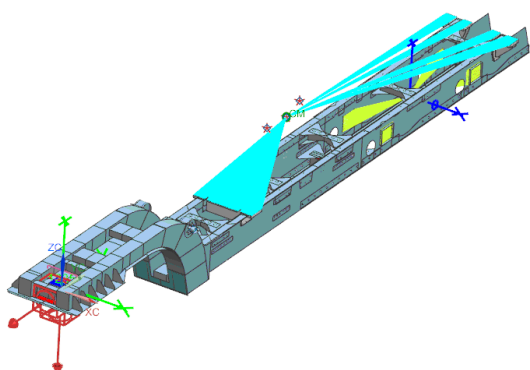


Рис. 7. Итоговая конечноэлементная модель полуприцепа

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

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

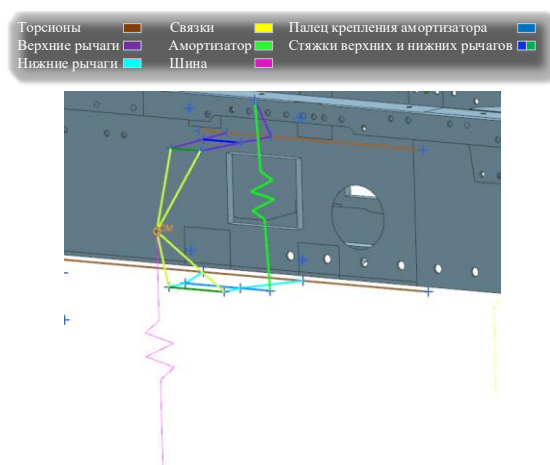


Рис. 8. Модель подвески полуприцепа

#### 4. Результаты расчета напряженно-деформированного состояния полуприцепа

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

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

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



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

Таблица 1

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния полуприцепа (режим I)

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

Таблица 2

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния полуприцепа (режим II)

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

Таблица 3

Сравнение результатов расчета усилий в опорах численно и аналитически

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

## 5. Основные выводы и рекомендации

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

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

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

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

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

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

## Список литературы

1. Пат. 2337023 Рос. Федерация: МПК7 В61В 7/00. Мобильная подвесная канатная дорога / Короткий А.А., Хальфин М.Н., Маслов В.Б. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ. № 2007102705/11; заявл. 24.01.2007; опубл. 27.10.2008, Бюл. 30.

2. Пат. 2465423 Рос. Федерация: МПК7 E04H 3/14. Стадион / Короткий А.А., Приходько В.М. Кустарев Г.В. и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Инженерно-консультационный центр «Мысль» НГТУ. № 2011112660/03; заявл. 01.04.2011; опубл. 27.10.2012, Бюл. 30.

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

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

## References

1. Patent RU 2337023, B61B 7/00. Mobilnaya podvesnaya kanatnaya doroga [Mobile ropeway]. Korotkiy A.A., Khalphin M.N., Maslov V.B. Published 27.10.2008. (In Russian)

2. Patent RU 2465423, E04H 3/14. Stadion [Stadium]. Korotkiy A.A., Prihodko V.M., Kustarev G.V. Published 27.10.2012. (In Russian)

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

4. Makurin A.N., Obryadin V.P. K voprosu ob ispolzovanii mobilnykh vozdushnykh kanatnykh dorog dlya avariyno-spatatelnykh rabot [On the use of mobile aerial ropeways for rescue operations]. *Nauchnye i obrazovatelnye problemy grazhdanskoj zashchity*, 2015, No. 4, pp. 73-77. (In Russian)

5. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Soldatchenkov S.P., Ignatov D.A. The experimental model creation of a mobile ropeway by

душных канатных дорог для аварийно-спасательных работ // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015. № 4. С. 73-77.

5. Лагереv И.А., Таричко В.И., Солдатченков С.П., Игнатов Д.А. Создание экспериментального макета мобильной канатной дороги с использованием 3D-печати // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 221-230. – DOI: <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2019-05-02-221-230>.

6. Мехренцев А.В., Герц Э.Ф., Мартинек Я., Новак Л. Канатные трелевочные установки. Екатеринбург, Брно: УГЛТУ, 2012. 19 с.

7. Лагереv А.В., Лагереv И.А. Оптимальное проектирование линий канатного метро в условиях сильно урбанизированной городской среды // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2015. Т.1. № 1. С. 57-65.

8. Лагереv А.В., Лагереv И.А., Короткий А.А., Панфилов А.В. Концепция инновационной системы городского транспорта «Канатное метро города Брянска» // Вестник Брянского государственного технического университета. 2012. №3. С. 12-15. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1302025>

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

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

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

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

6. Mekhrentsev A.V., Gerts E.F., Martinek Ya., Novak L. *Kanatnye trelevochnye ustanovki* [Cable skidders]. Ekaterinburg, Brno, UGLTU, 2012. 19 p. (In Russian)

7. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Optimal design of cable subway lines in a highly urbanized city environment. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2015, Vol.1, No.1, pp. 57-65. (In Russian)

8. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Korotkiy A.A., Panfilov A.V. Innovation transport system "Bryansk rope metro". *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No. 3, pp. 12-15. (In Russian)

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

9. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Cable transport system "Kanatnoe metro" towers distance optimization. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, No.4, pp. 22-30.

10. Korotkiy A.A., Lagerev A.V., Meskhi B.Ch., Lagerev I.A., Panfilov A.V. *Razvitie transportnoy infrastruktury krupnykh gorodov i territoriy na osnove tekhnologii kanatnogo metro* [The development of transport infrastructure of large cities and territories on the basis of technology of passenger ropeways]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2017. 344 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1311913> (In Russian)

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

12. Lagerev I.A., Tarichko V.I., Lagerev A.V. Formation of the strategy for restoring the rope system of the mobile transport and reloading rope complex during operation. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2, pp. 276-293. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293 (In Russian)

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



04-462-480

12. Лагерев И.А., Таричко В.И., Лагерев А.В. Формирование стратегии восстановления канатной системы мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса в процессе эксплуатации // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. №2. С. 276-293. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-02-276-293

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

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

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

16. Вершинский А.В., Лагерев И.А., Шубин А.Н., Лагерев А.В. Численный анализ металлических конструкций подъемно-транспортных машин. Брянск: РИО БГУ, 2014. 186 с.

17. Вершинский А.В., Лагерев И.А., Шубин А.Н., Лагерев А.В. Расчет металлических конструкций подъемно-транспортных машин методом конечных элементов. Брянск: РИО БГУ, 2015. 210 с.

18. Киятина И.И., Лагерев И.А. Формирование компетенций в области современных сквозных цифровых технологий у обучающихся по направлению «Реклама и связи с общественностью» // Ученые записки

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

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

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

16. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Chislennyi analiz metallicheskh konstruktsii podemno-transportnykh mashin* [Numerical analysis of metal constructions of lifting-transport machines]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2014. 186 p. (In Russian).

17. Vershinckii A.V., Lagerev I.A., Shubin A.N., Lagerev A.V. *Raschet metallicheskh konstruktsii podemno-transportnykh mashin metodom konechnykh elementov* [Calculation of metal structures of lifting and transport machines by the finite element method]. Bryansk, Bryanskiy Gosudarstvennyy Universitet, 2015. 210 p. (In Russian).

18. Kiyutina I.I., Lagerev I.A. Formation of competencies in the field of modern end-to-end digital technologies for students in the direction of PR, *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, No.2,

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

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

20. Таричко В.И., Химич А.В. Комплексная математическая модель мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №4. С. 523-532. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-04-523-532

pp. 11-15. (In Russian)

19. Lagerev I.A. Simulation of stress-strain state in crane-manipulator of pipeline welding machine. *Izvestiya vyshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, 2011, No.4, pp. 29-36. (In Russian)

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

УДК 624.04 (075)

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНУСНОГО РАСКАТЧИКА  
ДЛЯ ГЛУБОКОГО УПЛОТНЕНИЯ ОСНОВАНИЙ ДОРОГSELECTION OF RATIONAL PARAMETERS OF THE CONE ROLLER  
FOR DEEP COMPACTION OF ROAD BASESТиллоев К.З., Кромский Е.И., Кондаков С.В.  
Tilloev K.Z., Kromsky E.I., Kondakov S.V.Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Россия)  
South Ural State University (Chelyabinsk, Russian Federation)

**Аннотация.** Статья посвящена методике проектирования конусного раскатчика для глубокого уплотнения грунта, используемого в качестве рабочего органа гусеничного экскаватора. Одним из важных конструктивных параметров конусного раскатчика является угол конуса. Известные методики позволяют определить угол конуса для других технологических задач, например, для разрыхления мерзлого грунта и не могут быть напрямую применены для решения поставленной задачи. Авторами предложена оригинальная методика выбора рациональных параметров конусного раскатчика, в том числе, угол конуса. В методике использована математическая модель взаимодействия конусного раскатчика с уплотняемым грунтом. В процессе решения математической модели определены следующие параметры: зависимость части площади боковой поверхности конуса, зависимость объема вытесненного грунта на контактной поверхности конуса от пятна контакта, суммарная сила, сила конусного раскатчика, действующая на грунт при кручении, и осевое усилие при внедрении конуса, прикладываемое стрелой экскаватора. Для выявления оптимального значения угла конуса проведено исследование функции объема вытесняемого грунта от угла конуса и осевого усилия при внедрении от угла конуса. В итоге определено, что оптимальным углом конуса является  $24^{\circ}$ , который обеспечит наибольшую эффективность по критерию производительность / затраты.

**Ключевые слова:** гусеничный экскаватор, конусный раскатчик, угол конуса, уплотнения грунта, пятно контакта.

**Дата принятия к публикации:** 20.02.2021  
**Дата публикации:** 25.03.2021

**Сведения об авторах:**

**Тиллоев Кудратулло Зувайдуллоевич** – аспирант кафедры «Колесные и гусеничные машины» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ),  
e-mail: kudratullo.tilloev@bk.ru.

**Кромский Евгений Ильич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры

**Abstract.** The article is devoted to the method of designing a cone roller for deep compaction of soil used as the working body of a crawler excavator. One of the most important design parameters of a cone roll is the angle of the cone. Known methods allow determining the cone angle for other technological tasks, for example, for loosening frozen soil, and cannot be directly applied to solve the problem. The authors propose an original method for selecting rational parameters of a cone roller head, including the angle of the cone. The method uses a mathematical model of the interaction of a cone roller with compacted soil. In the process of solving the mathematical model are the following parameters: the dependence of the area of the lateral surface of a cone, the dependence of the volume of displaced soil on the contact surface of the cone from the contact patch, the total force, cone force acting on the ground torsional, and axial force in the implementation of the cone, applied by the excavator boom. To identify the optimal value of the cone angle, the function of the volume of displaced soil from the cone angle and the axial force during penetration from the cone angle was studied. As a result, it is determined that the optimal angle of the cone is  $24^{\circ}$ , which will provide the greatest efficiency according to the performance / cost criterion.

**Keywords:** crawler excavator, cone roller, cone angle, soil compaction, contact spot.

**Date of acceptance for publication:** 20.02.2021  
**Date of publication:** 25.03.2021

**Authors' information:**

**Kudratullo Z. Tilloev** – postgraduate of Department «Wheeled and Tracked Vehicles» at South Ural State University, e-mail: kudratullo.tilloev@bk.ru.

**Evgeni I. Kromsky** – PhD in Technical Sciences, associate Professor, Professor of Department «Wheeled



«Колесные и гусеничные машины» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), e-mail: [ekromskiy@mail.ru](mailto:ekromskiy@mail.ru).

**Кондаков Сергей Владимирович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Колесные и гусеничные машины» ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ), e-mail: [tanksv@mail.ru](mailto:tanksv@mail.ru).

and Tracked Vehicles» at South Ural State University, e-mail: [ekromskiy@mail.ru](mailto:ekromskiy@mail.ru).

**Sergey V. Kondakov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department «Wheeled and Tracked Vehicles» at South Ural State University, e-mail: [tanksv@mail.ru](mailto:tanksv@mail.ru).

## 1. Введение

Строительство автомобильных дорог всегда требует значительной предварительной подготовки, в основном это связано с необходимостью уплотнения дорожного полотна. Уплотнение грунтовых оснований земляного полотна является эффективным методом улучшения физико-механических свойств основания дорожного полотна. Причем уплотнять приходится не только поверхностный слой, но и слои, лежащие на глубине нескольких метров. Игнорирование этого фактора приводит к быстрому выходу из строя дорожного полотна, заключающемуся в появлении колеи и выбоин. В итоге, становится невозможным эксплуатировать дорогу в соответствии с техническим заданием. Эти проблемы могут быть решены за счет изменения технологии уплотнения основания дорожного полотна и модернизации механизмов для уплотнения грунта на базе гусеничного экскаватора.

Послойное уплотнение грунта толщиной до 0,8 м выполняют грунтоуплотняющие машины, такие как дорожные катки, трамбовки, вибротрамбовки и др. разного типа и размеров [1, 2].

При использовании послойного уплотнения грунта часть жидкости и воздуха запрессовывается в уплотненный грунт, образуя неравномерную структуру. Увеличение массы и мощности базовых колесных и гусеничных машин только усугубляет это явление.

Обработка насыпных и пористых материалов различных инженерных сооружений может осуществляться с использованием специального оборудования [3-6]. При уплотнении грунтов на большую глубину, достигающую нескольких метров, - это земляное полотно автомобильных дорог, дамбы, плотины и дру-

гие насыпи, используют оборудование для глубокого уплотнение грунта.

Существующие специальные механизмы для работы с повышенными толщинами слоев материала без выемки грунта используют навесное оборудование колесных и гусеничных машин в виде многотонных конусообразных грузов или раскатчиков в виде винта. Данные механизмы уплотняют грунт на значительную толщину - порядка 4...6 м.

При использовании техники для глубокого уплотнения в виде свай без выемки грунта эффект компрессионного сжатия газа внутри уплотняемого грунта также сохраняется.

Таким образом, механизмы для поверхностного уплотнения грунтов и часть механизмов глубокого уплотнения запрессовывают воздух внутрь уплотняемого грунта, что способствует в дальнейшем достаточно быстрому разрушению уплотненного ранее грунта.

Новое направление совершенствования машин для уплотнения, которому посвящена данная работа, – это уплотнение на большую глубину, позволяющее увеличить грузоподъемность дороги, повысить нагрузку от автомобиля на единицу проезжей части, повысить прочность основания дороги, минимизировать фильтрацию воздуха как внутри всего основания земляного полотна, так и сквозь его отдельные элементы для обеспечения устойчивости структуры грунта.

В процессе выполнения работ по уплотнению основания дорог, промышленных и гражданских объектов особое внимание уделяется выбору рациональных параметров уплотняющих машин и механизмов.

Целью данного исследования является выбор рациональных параметров рабочего оборудования экскаватора, в частности, конусного раскатчика, что расширяет потребительские свойства гусеничного экскаватора.

## 2. Объект исследования

Объектом является гусеничный экскаватор, оборудованный конусным раскатчиком для глубокого уплотнения грунта (рис.1) [7].

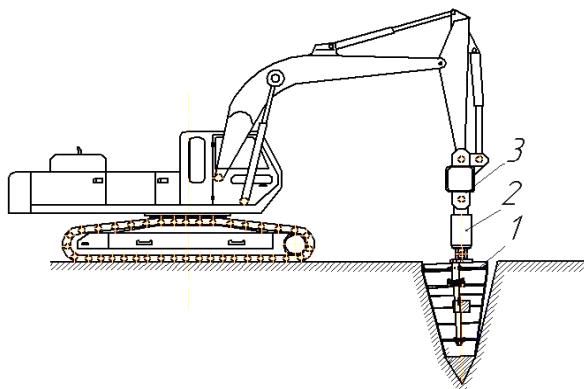


Рис.1. Конусный раскатчик на базе гидравлического экскаватора: 1 – конусный раскатчик; 2 – гидровращатель; 3 – траверса

Конусный раскатчик (рис. 2) состоит из внешнего корпуса конусообразной оболочки 1, вала коленчатой формы 2, опоры для подшипников 3, 4 и противовеса 5. Схема конфигурации разрабатываемого объекта (рис. 3) с учетом большого диаметра конуса и эксцентриситета коленчатого вала:

$$D = 2e + d,$$

где  $D$  – диаметр котлована;  $d$  – диаметр рабочего органа;  $e$  – эксцентриситет коленчатого вала.

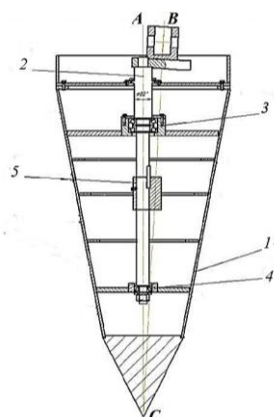


Рис. 2. Конусный раскатчик

Приводное прецессирующее звено 2 через подшипниковые опоры 3 и 4 периодически обкатывает грунтовый котлован последовательно вдавливая секторообразный объ-

ем материала в глубь грунтового массива, перемещая при этом частицы грунта из области максимального давления в сторону уплотнённого грунта.

Динамическая уравновешенность механической системы обеспечивается установкой противовеса 5 на коленчатом валу 2.

Вращающиеся детали узлов 3 и 4 установлены внутри корпуса 1, тем самым изолированы от внешней абразивной среды, что обеспечивает им надежную и долговечную работу в сравнении с известными ранее техническими устройствами [3-6].

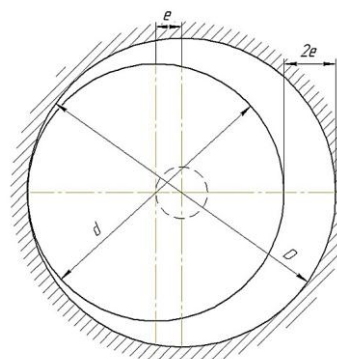


Рис. 3. Схема раскатки котлована (вид сверху)

Отличием нового технического решения является пересечение осей вращения приводного двигателя (А) и коленчатого вала (В) в точке при вершине конуса (С). В новой конструкции рассматриваемого механизма в процессе работы вершина конуса (С) перемещается по прямой линии.

## 3. Теоретические исследования

В соответствии с целью исследования была разработана математическая модель работы гусеничного экскаватора с навесным оборудованием, включающая в себя параметры базовой машины, геометрические размеры конусного раскатчика и физико-механические свойства грунта.

Затрачиваемая работа при уплотнении грунта новым рабочим органом зависит от угла конуса и физико-механические свойства грунта. Экспериментальные исследования [10] установили зависимость минимальной энергоемкости процесса внедрению конуса

для внедрения конусной штанги в мерзлый грунт до значения предела его прочности при рациональном угле заострения  $\alpha = 25...30^\circ$ .

Использовать результаты [10] напрямую не представляется возможным. Это связано с различием технологических целей: разрыхление мерзлого грунта кардинально отличается от уплотнения рыхлого грунта.

Расчетная схема взаимодействия конуса с уплотняемым грунтом приведена на рис. 4.

Для моделирования нового технологического оборудования в среде программирования VisSim в качестве исходных данных заданы геометрические параметры конусного раскатчика и образующей скважины в произвольной точке.

Геометрия среднего сечения конуса определена в соответствии с зависимостями (1) и (2) (рис. 4):

$$y_R = \sqrt{R^2 + x^2}; \quad (1)$$

$$y_r = e + \sqrt{r^2 + x^2}, \quad (2)$$

где  $x, y_R$  – координаты точки на среднем сечении скважины;  $x, y_r$  – координаты точки на среднем сечении конуса;  $R$  – радиус образующей скважины;  $r$  – радиус конусного раскатчика.

Расчет площади внедрения конуса с грунтом определен по формуле (3):

$$\delta = \int_0^{x_{\max}} (e + h + \sqrt{r^2 + x^2} - \sqrt{R^2 + x^2}) dx. \quad (3)$$

Размер  $x_{\max}$  определен из условия

$$R^2 - x^2 = (e - h)^2 + 2(e - h)(r^2 - x^2) + r^2 - x^2;$$

$$R^2 - r^2 - (e - h)^2 = 2(e - h)\sqrt{r^2 - x^2};$$

$$\frac{R^2 - r^2 - (e - h)^2}{2(e - h)} = r^2 - x^2.$$

Отсюда

$$x^2 = r^2 - \left( \frac{R^2 - r^2 - (e - h)^2}{2(e - h)} \right)^2,$$

где  $h$  – толщина перемещения грунта при контактной поверхности с конусом.

Половина угла охвата в среднем сечении конуса грунтом определена по формуле:

$$\alpha = \left( \frac{x}{h} \right). \quad (4)$$

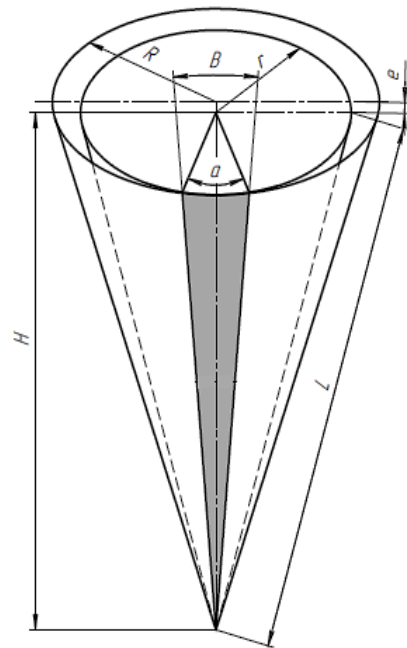


Рис. 4. Расчетная схема конуса при контакте с грунтом

Среднее перемещение грунта в среднем сечении конуса зависит от площади внедрения конуса, половины угла охвата и радиусом конуса.

Общая площадь боковой поверхности конуса (рис. 2) составляет

$$S_{\text{бок}} = \pi \cdot r \cdot L, \quad (5)$$

где  $L$  – длина ребра конуса, равная 1460 мм.

Часть площади боковой поверхности конуса, которая непосредственно контактирует с уплотняемым грунтом, определена в соответствии с блок-схемой рис. 5.

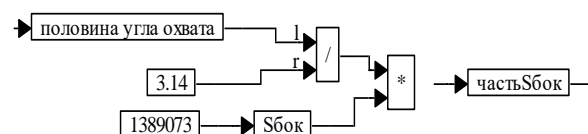


Рис. 5. Блок-схема определения часть площади боковой поверхности конуса

При координате конечной точки контакта конуса с грунтом  $x = 85$  мм часть площади боковой поверхности конуса равна  $S_{\text{бок}}^{\text{часть}} = 194831 \text{ мм}^2$  (рис. 6).

Объем вытеснения грунта на контактной поверхности конуса составляет

$$V_{\text{конт}} = \frac{\alpha}{2\pi} S_{\text{бок}} \cdot h_{\text{ср}}, \quad (6)$$

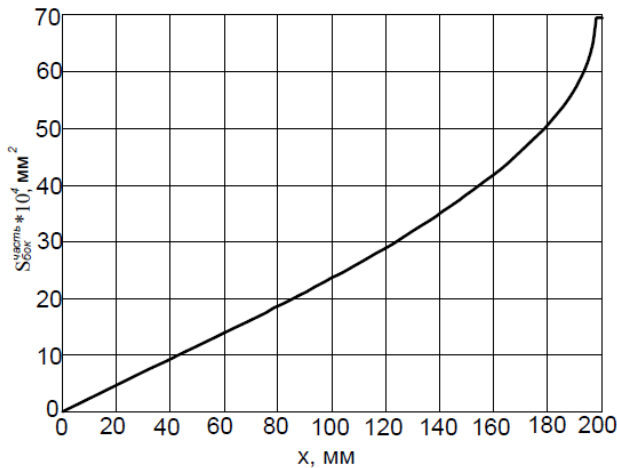


Рис. 6. Зависимость часть площади боковой поверхности конуса от пятна контакта

где  $h_{cp}$  – среднее перемещение грунта в среднем сечении конуса.

По рис. 7 при  $x = 85$  мм объём вытесненного грунта на контактной поверхности конуса равен  $v_{конт} = 493041$  мм<sup>3</sup>.

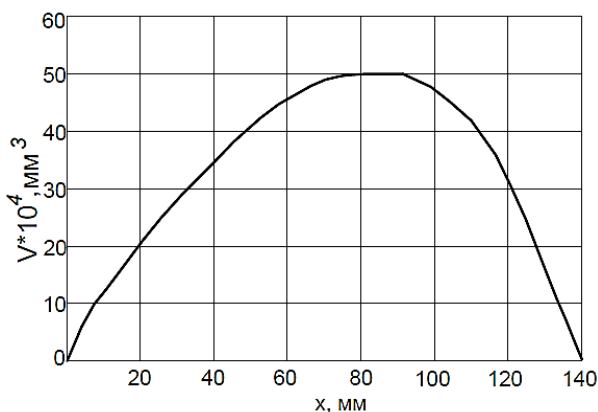


Рис. 7. Зависимость объёма вытеснения грунта на контактной поверхности конуса от пятна контакта

В результате определения площади контакта конусного раскатчика с грунтом и объёма вытесняемого грунта, что открывает возможность для оценки силовых показателей.

Суммарная сила согласно рис. 8 определена по формуле:

$$P_{\Sigma} = \sigma \cdot S_{бок}^{часть}, \quad (7)$$

где  $\sigma$  – напряжение на контактной поверхности конуса;  $S_{бок}^{часть}$  – часть площади боковой поверхности конуса, мм<sup>2</sup> (рис. 6).

Напряжение  $\sigma$  составляет

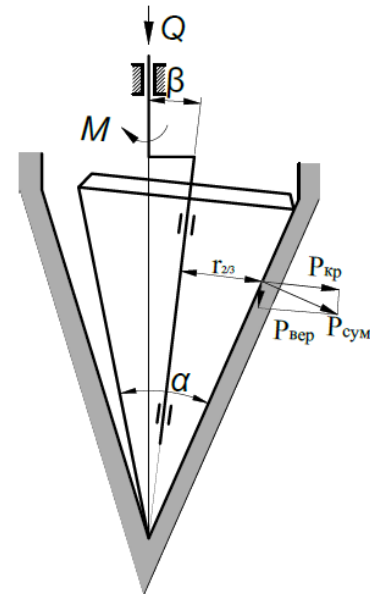


Рис. 8. Расчетная схема приложение сил

$$\sigma = C \cdot x^{\mu}, \quad (8)$$

где  $C$  – коэффициент общей деформации грунта, Н/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – показатель степени, характеризующий процесс деформации;  $x$  – деформация радиуса скважины, определяемая зависимостью

$$x = r + e. \quad (9)$$

Ранее было установлено [11, 12], что коэффициент общей деформации грунта  $C$  выбирается по показателю текучести грунта со следующими значениями:

$$C = (1,1-2,9) \cdot 10^6, \text{ Н/м}^3 \text{ при } 0,25 < I_L \leq 0,5,$$

$$C = (2,2-4,8) \cdot 10^6, \text{ Н/м}^3 \text{ при } 0,6 < I_L \leq 1,0,$$

где  $I_L$  – показатель текучести грунта.

Коэффициент общей деформации уменьшается с увеличением показателя текучести.

В статье рассмотрена работа конусного раскатчика в грунтах с показателем текучести  $0 < I_L \leq 0,75$ , что соответствует полутвердым, тугопластичным и мягкопластичным суглинкам, глинам и пластичным супесям.

Сила конусного раскатчика, действующая на грунт при кручении:

$$P_{кр} = P_{\Sigma} \cdot f_{mp}, \quad (10)$$

где  $f_{mp}$  – коэффициент трения грунта по стали (для песка  $f_{mp} = 0,35 \dots 0,5$ , для супесей и суглинка  $f_{mp} = 0,5 \dots 0,6$ , для глины  $f_{mp} = 0,6 \dots 0,7$  [13]).

Осевое усилие при внедрении конуса определяется зависимостью

$$P = \frac{Q}{\sin \frac{\alpha_k}{2} + \beta}. \quad (11)$$

Отсюда

$$Q = 2 \cdot P_{кр} \cdot \sin \frac{\alpha_k}{2} + \beta,$$

где  $P_{кр}$  – сила воздействия конусного раскатчика на грунт при кручении;  $\alpha_k$  – угол при вершине конуса;  $\beta$  – угол прецессии вала (рис. 8).

#### 4. Результаты исследования

Исследование проведено численным методом на примере промышленного образца конусного раскатчика. Результаты исследования приведены на рис. 9.

Для выявления оптимального значения угла конуса проведено исследования функции объема вытесняемого грунта от угла конуса  $V(\alpha)$  и осевого усилия рабочего органа при внедрении в грунт от угла конуса  $Q(\alpha)$ .

Под объёмом вытесняемого грунта подразумевается объём уплотняемого грунта в пятне контакта.

Анализ графиков показал:

– функция  $V(\alpha)$  имеет монотонный вид с тенденцией роста  $\frac{dV}{d\alpha} = 1981 \text{ мм}^3/\text{град}$ ;

– функция  $Q(\alpha)$  имеет перелом тенденции. В диапазоне  $20 \dots 24^\circ$  прирост составляет  $\frac{dQ}{d\alpha} = 1743 \text{ Н/град}$ , в диапазоне  $24 \dots 30^\circ$  –  $\frac{dQ}{d\alpha} = 2632 \text{ Н/град}$ .

При увеличении угла конуса больше  $24^\circ$  потребуются увеличение осевого усилия на

единицу прироста производительности примерно в 1,5 раза.

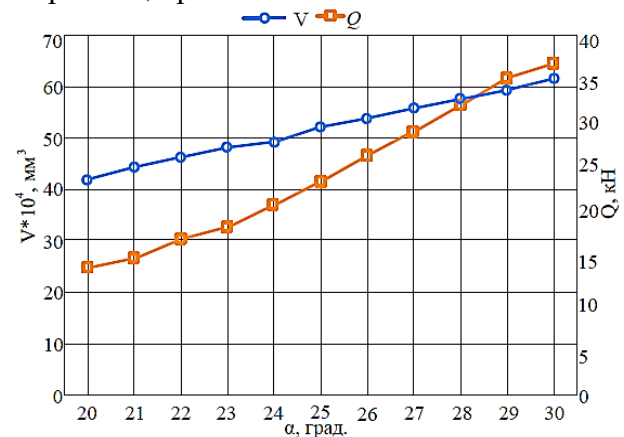


Рис. 9. Зависимость значения функции  $V(\alpha)$  и  $Q(\alpha)$

#### 5. Заключение

1. Разработана методика оптимизации угла конуса раскатчика для глубокого уплотнения грунта в основании дорог, промышленных и гражданских объектов.

2. Методика оптимизации апробирована для конусных раскатчиков с диаметром основания от 500 до 750 мм, длина ребра конуса 1460 мм и углом конуса от 20 до 30 градусов.

3. Выбран критерий оптимизации угла конуса по соотношению интенсивностей нарастания объема вытесняемого грунта и осевого усилия, приложенного стрелой экскаватора. Интенсивность нарастания объема вытесняемого грунта монотонна во всем диапазоне и равна  $1981 \text{ мм}^3/\text{град}$ , а интенсивность нарастания осевого усилия имеет перелом: в диапазоне  $20 \dots 24^\circ$  прирост составляет  $1743 \text{ Н/град}$ , в диапазоне  $24 \dots 30^\circ$  –  $2632 \text{ Н/град}$ .

4. Определен оптимальный угол конуса, равный  $24^\circ$ .



## Список литературы

1. Хартута Н.Я., Васильев Ю.М. Прочность, устойчивость и уплотнение грунтов земляного полотна автомобильных дорог. М.: Транспорт, 1975. 278 с.
2. Баловнев В.И., Глаголев С.Н., Данилов Р.Г. Погрузочно-разгрузочные и уплотняющие машины. Белгород: Изд-во БГТТУ, 2011. 464 с.
3. Миронов В.С., Фадеев П.Я., Фадеев В.Я., Мандрик М.С. Технология и оборудование для глубокого трамбования грунта // Строительные и дорожные машины. 2015. № 8. С. 2-4.
4. Луцкий С.Я., Сакун А.Б. Интенсивная технология упрочнения слабых оснований земляного полотна // Транспортное строительство. 2015. №8. С. 18–22.
5. Minaev O.P. Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures // 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2015: New Innovations and Sustainability, pp. 2747-2750. doi: 10.3208/jgssp.TC305-11
6. Massarsch, K.R., Fellenius, B.H. Evaluation of resonance compaction of sand fills based on cone penetration tests // Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement, 170 (3), pp. 149-158. DOI: 10.1680/jgrim.17.00004.
7. Кромский Е.И. Конусный раскатчик к гусеничному экскаватору // Вестник ЮУрГУ. Серия Машиностроение. 2018. Т.18. №1. С. 34-39. DOI: 10.14529/engin180104.
8. Кромский Е.И. Новое сменное оборудование гидравлического экскаватора // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2018. № 3. С.50-54.
9. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z. Promising Machine for Compacting Road-Building Materials // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Vol.1. P. 21–28. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9\_3.
10. Мартюченко И.Г., Иванов С.В. Выбор рациональных размерно-геометрических параметров мерзлоторыхлительного оборудования // Строительные и дорож-

## References

1. Harkhuta N.Ya., Vasiliev Yu.M. Strength, stability and compaction of soils of the roadbed. Moscow, Transport, 1975. 278 p. (In Russian).
2. Balovnev V.I., Glagolev S.N., Danilov R.G. Loading and unloading and sealing machines. Belgorod, 2011. 464 p. (In Russian).
3. Mironov V.S., Fadeev P.Ya., Fadeev V.Ya., Mandrik M.S. Technology and equipment for deep tamping of soil. *Stroitelnye i dorozhnye mashiny*, 2015, No. 8, pp. 2-4. (In Russian).
4. Lutsky S.Ya., Sakun A.B. Intensive technology of strengthening of weak foundations of the roadbed. *Transportnoe stroitelstvo*, 2015, No.8, pp. 18-22. (In Russian).
5. Minaev O.P. Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures. In: 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2015: New Innovations and Sustainability, pp. 2747-2750. DOI: 10.3208/jgssp.TC305-11.
6. Massarsch, K.R., Fellenius, B.H. Evaluation of resonance compaction of sand fills based on cone penetration tests. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement, 170 (3), pp. 149-158. DOI: 10.1680/jgrim.17.00004.
7. Kromsky E.I., Koodakov S.V., Tilloev K.Z. Cone Rolling to Crawler Excavator. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2018, vol. 18, No. 1, pp. 34-39. DOI: 10.14529/eogin180104. (In Russian).
8. Kromsky, E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z., Kadyrova H.I. New replacement equipment of a hydraulic excavator. *Polytechnic Bulletin. Series Engineering research*, 2018, No. 3, pp. 50-54. (In Russian).
9. Kromsky E.I., Kondakov S.V., Tilloev K.Z. Promising Machine for Compacting Road-Building Materials. In: Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Vol. 1. P. 21–28. DOI: 10.1007/978-3-030-22041-9\_3.
10. Martyuchenko I.G., Ivanov S.V. Se-



УДК (УДК) 625.8

УПРУГОЕ ПОСЛЕДЕЙСТВИЕ В ПРОЦЕССЕ УПЛОТНЕНИЯ  
АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИELASTIC AFTEREFFECT IN THE PROCESS OF ASPHALT CONCRETE  
MIXTURE COMPACTIONШишкин Е.А., Иванченко С.Н., Смоляков А.А.  
Shishkin E.A., Ivanchenko S.N., Smolyakov A.A.Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Россия)  
Pacific national university (Khabarovsk, Russian Federation)

**Аннотация.** В качестве покрытия автомобильных дорог преимущественно используется асфальтобетон различных марок. Качество и долговечность покрытия зависит от его плотности. Для достижения требуемой плотности асфальтобетонного покрытия применяют дорожные катки. Рабочим органом катка является металлический валец либо набор пневматических шин. В статье рассмотрен процесс укатки асфальтобетонной смеси гладким металлическим вальцом. Принята реологическая модель силового взаимодействия гладкого вальца с материалом, включающая упругие, вязкий и пластический элементы. Произведена корректировка принятой модели с учетом исследуемого процесса упругого последействия, протекающего в асфальтобетонной смеси при уплотнении. Установлен закон поведения асфальтобетонной смеси при упругом последействии. Разработана имитационная модель для изучения поведения материала в процессе упругого последействия. В ходе динамического моделирования установлена взаимосвязь физико-механических характеристик уплотняемого материала с конструктивными и технологическими параметрами дорожной катка. Проведен статистический анализ конструктивных параметров существующих моделей дорожных катков. Результаты анализа, а также полученные зависимости могут быть использованы при назначении технологических режимов работы комплекта дорожных катков при уплотнении асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги. Учет упругого последействия при назначении режимов работы уплотняющей техники позволит повысить эффективность уплотнения, а также качество получаемого покрытия.

**Ключевые слова:** асфальтобетонная смесь, уплотнение, гладковальцовый каток, реологическая модель, упругое последействие, эффективность.

**Дата принятия к публикации:** 02.02.2021  
**Дата публикации:** 25.03.2021

**Сведения об авторах:**

**Шишкин Евгений Алексеевич** – старший преподаватель кафедры транспортно-технологических

**Abstract.** Asphalt concrete of various brands is mainly used as a road surface. The quality and durability of the coating depends on its density. To achieve the required density of the asphalt concrete pavement, road rollers are used. The working body of the roller is a metal drum or a set of pneumatic tires. The article discusses the process of the asphalt concrete mixture compaction with a smooth metal drum. A rheological model of the force interaction of a smooth drum with a material is adopted, which includes elastic, viscous and plastic elements. The adopted model was corrected taking into account the investigated process of elastic aftereffect that occurs in the asphalt concrete mixture during compaction. The law of behavior of asphalt-concrete mixture with elastic aftereffect is established. A simulation model has been developed to study the behavior of a material in the process of elastic aftereffect. In the course of dynamic modeling, the relationship between the physical and mechanical characteristics of the compacted material with the design and technological parameters of the road roller was established. A statistical analysis of the design parameters of existing models of road rollers has been carried out. The results of the analysis, as well as the obtained dependencies, can be used to designate the technological modes of operation of a set of road rollers when compacting the asphalt concrete pavement of a motor road. Taking into account the elastic aftereffect when assigning the operating modes of the compaction equipment will improve the compaction efficiency, as well as the quality of the resulting coating.

**Keywords:** asphalt-concrete mix, compaction, smooth drum roller, rheological model, elastic aftereffect, efficiency.

**Date of acceptance for publication:** 02.02.2021  
**Date of publication:** 25.03.2021

**Authors' information:**

**Evgeniy A. Shishkin** – senior lecturer of Department of transport and technological systems in construc-

систем в строительстве и горном деле, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»,  
e-mail: 004655@pnu.edu.ru.

**Иванченко Сергей Николаевич** – доктор технических наук, профессор, ректор ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет»,  
e-mail: sni@mail.khstu.ru.

**Смоляков Александр Андреевич** – магистрант, ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», e-mail: [2012003170@pnu.edu.ru](mailto:2012003170@pnu.edu.ru).

tion and mining at Pacific National University,  
e-mail: 004655@pnu.edu.ru.

**Sergej N. Ivanchenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector of Pacific National University,  
e-mail: sni@mail.khstu.ru.

**Aleksandr A. Smolyakov** - graduate student at Pacific National University,  
e-mail: 2012003170@pnu.edu.ru.

## 1. Введение

Асфальтобетон является основным покрытием автомобильных дорог. Этот материал одновременно характеризуется упругими, вязкими и пластичными свойствами, что затрудняет теоретическое описание его поведения под нагрузкой. Для достижения требуемого качества асфальтобетонного покрытия его уплотняют дорожными катками. Одним из процессов, протекающих в асфальтобетонной смеси при уплотнении, является упругое последствие [1].

В данной работе проведено исследование указанного процесса с использованием реологического моделирования.

## 2. Теоретическое исследование упругого последствия

В отличие от идеально упругого тела, у которого реакция на быстрое изменение силового воздействия мгновенна, для упруго-вязкого тела характерно явление упругого последствия. Это явление характеризуется запаздыванием реакции (деформации) материала на быстрое изменение силового воздействия [2]. Рассмотрим процесс упругого последствия, который протекает в асфальтобетонной смеси после нарушения контакта с гладким вальцом, с использованием реологического моделирования [3, 4]. Существует множество моделей, описывающих поведение вязкоупругих материалов под нагрузкой [5]. В качестве модели асфальтобетонной смеси примем модель, изображенную на рис. 1.

В момент отрыва материала от поверхности вальца все части реологической модели, обладающие идеальной упругостью, полностью восстанавливают свою первоначальную форму. Для рассматриваемой модели (рис. 1)

такой частью является упругий элемент  $b$ . Однако упругий элемент  $c$  в момент отрыва все еще имеет некоторую деформацию  $h_c$ , благодаря сопротивлению связанного с ним вязкого элемента  $\mu$ .

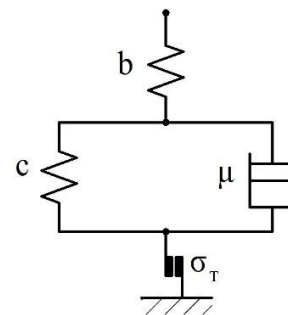


Рис. 1. Модель асфальтобетонной смеси

Именно энергия, сохраненная в деформированном элементе  $c$  в момент отрыва, и будет потрачена на упругое последствие. По окончании процесса последствия элемент  $c$  также полностью разгрузится и вернется в первоначальное состояние.

Найдем величину деформации  $h_c$ . Для этого обратимся к рис. 2:

$$h_c = \left[ x_2^2 - (x_1 - x_2)^2 - (x_2 - x_3)^2 \right] \cdot (2R)^{-1}, \quad (1)$$

где  $x_1$ ,  $x_2$  – координаты границ зоны пластического течения;  $x_3$  – координата точки отрыва вальца от материала.

Поскольку элементы  $b$  и  $\sigma_T$  (рис. 1) в процессе упругого последствия не участвуют, поведение материала аналогично поведению классического тела Кельвина (рис. 3) при условии, что оно имеет в начальный момент времени деформацию, равную  $h_c$  и, затем, предоставлено самому себе.

Дифференциальное уравнение модели Кельвина общеизвестно:

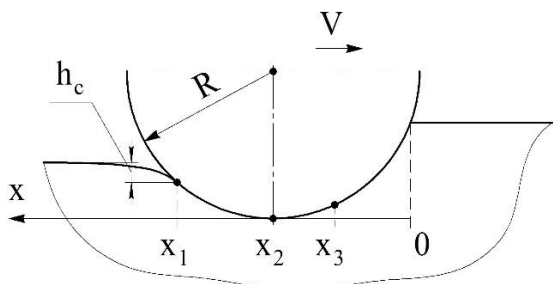


Рис. 2. Схема взаимодействия вальца с асфальтобетонной смесью

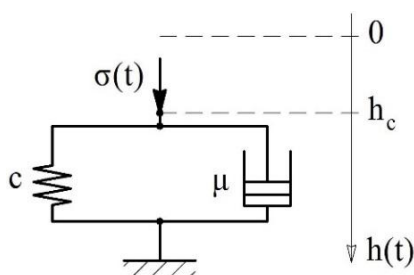


Рис. 3. Модель тела Кельвина

$$\sigma = \mu \frac{dh}{dt} + ch. \quad (2)$$

Так как в процессе последействия внешняя сила отсутствует ( $\sigma = 0$ ), уравнение (2) примет вид

$$\mu \frac{dh}{dt} + ch = 0. \quad (3)$$

Общим решением дифференциального уравнения (3) является следующее выражение

$$h(t) = Ce^{-\frac{c}{\mu}t}. \quad (4)$$

Найдем частное решение, исходя из начальных условий:  $t = 0, h(t) = h_c$

$$h(t) = h_c e^{-\frac{c}{\mu}t}. \quad (5)$$

С учетом (1) уравнение (5) примет вид

$$h(t) = \left[ x_2^2 - (x_1 - x_2)^2 - (x_2 - x_3)^2 \right] \times (2R)^{-1} \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (6)$$

где  $T = \mu \cdot c^{-1}$  – период упругого последействия.

Уравнение (6) представляет собой закон поведения материала при упругом последействии.

Отметим, что в уравнении (6) за начало отсчета времени принимается момент отрыва материала от поверхности вальца (момент  $t_1$ ,

соответствующий координате  $x_1$  на рис. 2), а за начало отсчета деформаций – поверхность уплотненного материала по окончании упругого последействия.

На основе уравнения (6) получена имитационная модель поведения асфальтобетонной смеси в процессе упругого последействия, представленная на рис. 4.

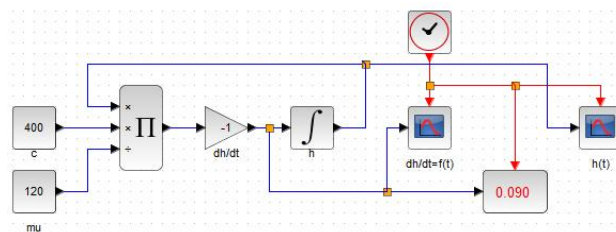


Рис. 4. Имитационная модель поведения асфальтобетонной смеси в процессе упругого последействия

Разработанная модель позволяет определять численные значения деформации и скорости деформации материала в различные моменты времени течения процесса упругого последействия (рис. 5, 6).

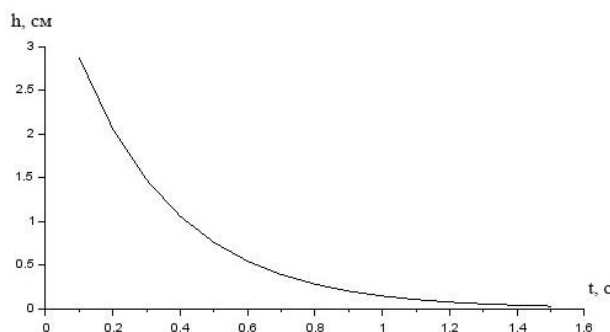


Рис. 5. График изменения деформации при упругом последействии

Согласно (6) период упругого последействия  $T$  определяется физико-механическими характеристиками асфальтобетонной смеси. Приведенный на рис. 6 график получен для материала, характеризующегося периодом  $T = 0,3 \text{ c}$ , на основе значений скорости деформации в моменты времени, кратные периоду упругого последействия. Для смеси, характеризующейся другим значением  $T$ , качественно график аналогичен приведенному на рис. 6. Анализ графика изменения скорости деформации показывает, что

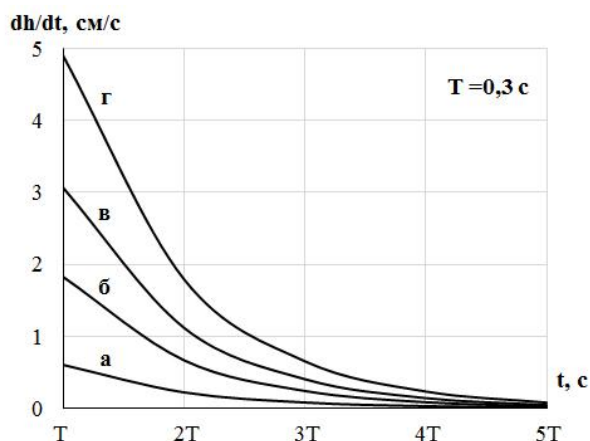


Рис. 6. График изменения скорости деформации при упругом последствии:

$$a - h_c = 0,5 \text{ см}; \quad б - h_c = 1,5 \text{ см};$$

$$в - h_c = 2,5 \text{ см}; \quad г - h_c = 4 \text{ см}$$

вне зависимости от начальной деформации материала процесс упругого последствия можно считать завершённым по прошествии пяти периодов упругого последствия  $T$ . Это утверждение согласуется с теоретическими исследованиями [6].

Введем понятие времени упругого последствия  $T_{уп} = 5T$ .

Результаты моделирования процесса упругого последствия упруго-вязких материалов с различными физико-механическими характеристиками представлены на рис. 7.

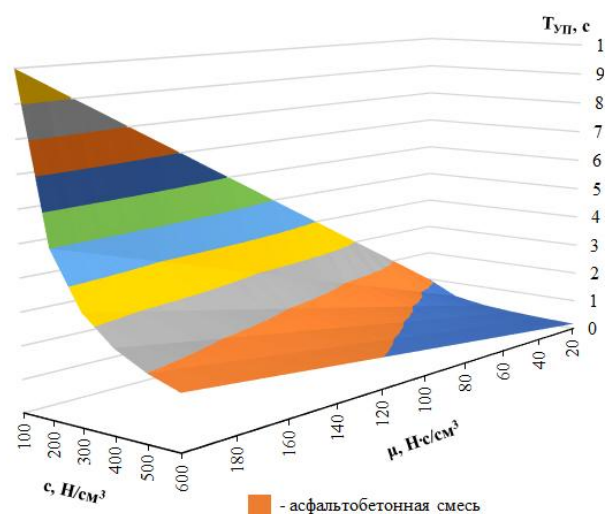


Рис. 7. График зависимости времени упругого последствия от физико-механических характеристик материала

Часть поверхности на рис. 7 характеризует процесс упругого последствия асфальтобетонной смеси при соответствующих значениях параметров  $c$  и  $\mu$ . Интерполяция полученных значений методом наименьших квадратов позволяет получить следующую зависимость

$$T_{уп} = 2,5667 - 0,01925 \cdot c + 0,000027 \cdot c^2 + 0,0462 \cdot \mu - 0,000074 \cdot c \cdot \mu. \quad (7)$$

В соответствии с рис. 7 для асфальтобетонной смеси значения времени упругого последствия  $T_{уп}$  находятся в диапазоне 0,9...1,7 с.

При уплотнении дорожным катком асфальтобетонная смесь подвергается периодическому воздействию [7]. Промежуток времени между воздействиями на заданную площадку покрытия передним и задним вальцом зависит от колесной базы  $A$  и скорости передвижения  $V$  катка. Для обеспечения высокой эффективности уплотнения смеси необходимо, чтобы материал успевал полностью восстановиться перед следующим воздействием. Для этого нужно, чтобы промежуток времени между соседними проходами вальца по одному следу был не меньше времени упругого последствия материала

$$\frac{A}{V} \geq T_{уп}. \quad (8)$$

В настоящее время промышленностью выпускаются тандемные дорожные катки. Расстояние между вальцами, называемое колесной базой, варьируется для различных моделей.

В результате статистического анализа более 250 моделей дорожных катков отечественного и зарубежного производства (рис. 8) получена статическая зависимость колесной базы катка  $A$  от его эксплуатационной массы  $M_э$ ,

$$A = -18,787M_э^2 + 477,99M_э + 624,83. \quad (9)$$

### 3. Практическая значимость полученных результатов

Проведенный статистический анализ (рис. 8) позволил получить диапазоны значений колесной базы  $A$  для различных типов катков:

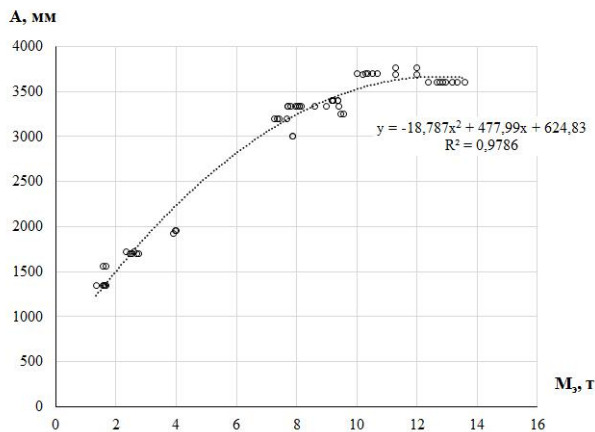


Рис. 8. Взаимосвязь колесной базы и эксплуатационной массы катка

- легкие катки  $A = 1,3 - 2 \text{ м}$ ;
- средние катки  $A = 3 - 3,4 \text{ м}$ ;
- тяжелые катки  $A = 3,6 - 3,8 \text{ м}$ .

Преобразуем условие (8) к виду

$$V \leq \frac{A}{T_{\text{уп}}}. \quad (10)$$

С учетом (7) и (9) условие (10) примет вид

$$V \leq (-18,787M_0^2 + 477,99M_0 + 624,83) \times \\ \times (2,5667 - 0,01925c + 0,000027c^2 + \\ + 0,0462\mu - 0,000074c\mu)^{-1}. \quad (11)$$

Условие (11) устанавливает связь между параметрами дорожного катка и характеристиками асфальтобетонной смеси, и позволя-

ет получать рекомендуемые значения скорости катка для различных этапов уплотнения материала.

Произведенные по формуле (11) расчеты показали, что для предварительного этапа уплотнения асфальтобетонной смеси рекомендуемая скорость находится в диапазоне 2...3 км/ч, для основного – 4...5 км/ч, а для заключительного – 6...8 км/ч. Эти значения соответствуют рекомендациям [8 - 10].

#### 4. Заключение

Установлено, что для упруго-вязких тел упругое последствие может протекать с различной скоростью, а конечная деформация материала может достигать различных значений. На интенсивность процесса упругого последствия влияют вязкость и жесткость материала.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при назначении технологических режимов работы комплекта дорожных катков при уплотнении асфальтобетонного покрытия автомобильной дороги. Для этого необходимо получить значения физико-механических характеристик асфальтобетонной смеси на различных этапах уплотнения материала. Это может быть сделано в результате проведения серии лабораторных экспериментов.

#### Список литературы

1. Иванченко С.Н. Основные положения теории уплотнения композиционных материалов при сложном нагружении // Строительные и дорожные машины: сборник трудов. Хабаровск. 1996. С. 100-107.
2. Сунь И., Хуан Б., Чен Ц. Единая методика оперативного определения спектров дискретной релаксации и ретардации асфальтобетона // Строительство и строительные материалы. 2015. № 93. С. 35-48.
3. Белицкий В.Д., Катунин А. . Тезаурус математических моделей процесса уплотнения асфальтобетонной смеси // Омский научный вестник. 2013. №3 (123). С. 18-21.
4. Збицяк А., Гресикевич В., Вакулич А.

#### References

1. Ivanchenko S.N. The theory basic provisions of composite materials compaction under complex loading. In: *Stroitelnye i dorozhnye mashiny* [Construction and road machines]. Khabarovsk, 1996, pp. 100-107. (In Russian).
2. Sun Y., Huang B., Chen J. Unified procedure for rapidly determining asphalt concrete discrete relaxation and retardation spectra. *Construction and Building Materials*, 2015, No. 93, pp 35-48. (In English).
3. Belickij V.D., Katunin A.V. Mathematical models thesaurus of the asphalt concrete mixture compaction process. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2013, No. 3 (123), pp. 18-21. (In Russian).
4. Zbiciak A., Grzesikiewicz W., Wakulicz

Одномерные реологические модели асфальтобетонных смесей // Логистика. 2010. №6. С. 3825-3832.

5. Ерохин С.В., Гачаев А.М. Модель деформаций вязкоупругих материалов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2011. №1. С. 39-43.

6. Биггз У.Д. Механическое поведение инженерных материалов. Амстердам: Эльзевир, 2013. 156 с.

7. Кромский Е.И., Лебедь А.Р., Гаврилина И.Н. Совершенствование техники и технологии уплотнения дорожно-строительных материалов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2016. №2 (16). С. 22-27.

8. Костельов М.П., Посадский Л.М. Технологические особенности и параметры уплотнения горячего асфальтобетона гладковальцовыми катками // Уплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожных одежд: труды Союздорнии. Москва. 1980. С. 61-79.

9. СТО НОСТРОЙ 2.25.37-2011. Автомобильные дороги. Устройство асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. Часть 2. Устройство асфальтобетонных покрытий из горячего асфальтобетона. М.: ООО Издательство «БСТ», 2012. 42 с.

10. ТР 103-07. Технические рекомендации по устройству дорожных конструкций с применением асфальтобетона. М.: ГУП НИИМосстрой, 2007. 109 с.

† A. One-dimensional rheological models of asphalt-aggregate mixtures. *Logistyka*, 2010, No. 6, pp 3825-3832. (In English).

† 5. Erohin S.V., Gachaev A.M. Deformation model of viscoelastic materials. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstrukcij i sooruzhenij*, 2011, No. 1, pp. 39-43. (In Russian).

† 6. Biggs W.D. *The mechanical behavior of engineering materials*. Amsterdam, Elsevier. 2013. 156 p.

† 7. Kromskij E.I., Lebed A.R., Gavrilina I.N. Improvement of technique and technology for compaction of road building materials. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitelstvo i arhitektura*, 2016, No. 2 (16), pp. 22-27. (In Russian).

† 8. Kostelov M.P., Posadskij L.M. Technological features and parameters of hot asphalt concrete compaction with smooth drum rollers. *Uplotnenie zemlyanogo polotna i konstruktivnykh sloev dorozhnykh odezhd* [Proceedings of the Union Road Research Institute]. Moscow, 1980, pp. 61-79.

† 9. *СТО НОСТРОЙ 2.25.37-2011. Автомобильные дороги. Устройство асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. Часть 2. Устройство асфальтобетонных покрытий из горячего асфальтобетона* [Motor road. The device of asphalt concrete coverings of highways. Part 2. The device of asphalt concrete coverings from hot asphalt concrete]. Moscow, ООО Izdatelstvo "BST", 2012. 42 p. (In Russian).

† 10. *ТР 103-07. Технические рекомендации по устройству дорожных конструкций с применением асфальтобетона* [Technical recommendations for the construction of road structures using asphalt concrete]. Moscow, ГУП НИИМосстрой, 2007. 109 p. (In Russian).



УДК (UDC) 621.7

## ВЫБОР РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ ИЗ СПЕЧЕННОЙ БРОНЗЫ

## SELECTION OF ELECTRIC SPARK PROCESSING MODES FOR ELECTRODES FROM SINTERED BRONZE

Романов И.В., Задорожний Р.Н.  
Romanov I.V., Zadorozhny R.N.ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (Москва, Россия)  
Federal Scientific Agroengineering Center VIM (Moscow, Russian Federation)

**Аннотация.** Метод электроискровой обработки отлично зарекомендовал себя в технологиях ремонта и восстановления деталей. Эксплуатационные свойства покрытий, полученных таким методом, зависят от микроструктуры, химического и фазового состава электродных материалов. Значительное улучшение эксплуатационных свойств, например, износостойкости, достигается формированием наноструктурированных покрытий при использовании электродов с определенным содержанием легирующих наноматериалов. Получать такие материалы с наименьшими затратами возможно электроэрозионным диспергированием отходов машиностроительных производств. В данной статье рассмотрены электроды, полученные спеканием бронзового порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования. Такие материалы являются новыми для процесса электроискровой обработки, поэтому важно изучить и подобрать оптимальные режимы нанесения, так как качественной характеристикой процесса является показатель переноса материала электрода на деталь, который зависит от режимов обработки и параметров установки. Целью исследования является выбор режимов установки по электроискровой обработке для оптимального нанесения материала, а также изучение степени приращения покрытия при электроискровой обработке. Нанесение покрытия осуществлялось с помощью установки для электроискровой обработки модели «Вестрон» тип АИ-007, электродный материал был получен по технологии искрового плазменного спекания бронзового порошка, наплавка производилась на стальные образцы размером 14×14×40 мм. Покрытия наносились на образцы с равной площадью в три слоя при разных режимах обработки. Был определен наиболее оптимальный режим нанесения покрытия электродом из спеченной бронзы, полученной из отходов машиностроительных производств методом электроэрозионного диспергирования, что доказывает состоятельность такого способа получения электродных материалов.

**Ключевые слова:** электроискровая обработка, электрод, спеченная бронза, электроэрозионное диспергирование, медные сплавы, выбор режимов, перенос материала.

**Abstract.** The method of electrospark machining has proven itself well in the technology of repair and restoration of parts. The operational properties of coatings obtained by this method depend on the microstructure, chemical and phase composition of the electrode materials. A significant improvement in operational properties, for example, wear resistance, is achieved by the formation of nanostructured coatings using electrodes with a certain content of alloying nanomaterials. It is possible to obtain such materials at the lowest cost by electro-erosion dispersion of machine-building waste. This article discusses the electrodes obtained by sintering bronze powder obtained by the method of electroerosive dispersion. Such materials are new for the process of electrospark machining; therefore, it is important to study and select the optimal application modes, since a qualitative characteristic of the process is the indicator of the transfer of the electrode material to the part, which depends on the processing modes and installation parameters. The aim of the study is to select the modes of the installation for electrospark treatment for optimal deposition of the material, as well as to study the degree of coating increment during electrospark treatment. Coating was carried out using an installation for electrospark treatment mod. "Westron" type AI-007, electrode material was obtained by the technology of spark plasma sintering of bronze powder, surfacing was carried out on steel samples 14 × 14 × 40 mm in size, the work also used an Acculab ALC-210d4 analytical balance and an MG micrometer H25 GOST 6507-90. All coatings were applied to samples with an equal area in three layers under different processing conditions. After that, the increment in the thickness and mass of the electrode material on the sample surface was measured. Based on the results of the work, formulas were obtained and graphs were built. The most optimal mode of coating with an electrode made of sintered bronze obtained from machine-building waste by the method of electroerosive dispersion was determined, which proves the consistency of this method of obtaining electrode materials.

**Keywords:** electrospark machining, electrode, sintered bronze, electroerosive dispersion, copper alloys, choice of modes, material transfer.

Дата принятия к публикации: 21.12.2020 † Date of acceptance for publication: 21.12.2020  
Дата публикации: 25.03.2021 † Date of publication: 25.03.2021

#### Сведения об авторах:

**Романов Илья Владимирович** – младший научный сотрудник ЦКП «Нано-Центр», ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, e-mail: gosniti1953@mail.ru.  
ORCID: 0000-0001-5591-4692

**Задорожний Роман Николаевич** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ЦКП «Нано-Центр», ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, e-mail: gosniti8@mail.ru.  
ORCID: 0000-0002-8007-0732

#### Authors' information:

**Ilya V. Romanov** – Junior Researcher of Center for Collective Use "Nano-Center" at Federal Scientific Agroengineering Center VIM, e-mail: gosniti1953@mail.ru.  
ORCID: 0000-0001-5591-4692

**Roman N. Zadorozhny** – Ph.D., Leading Researcher of Center for Collective Use «Nano-Center», Federal Scientific Agroengineering, e-mail: gosniti8@mail.ru.  
ORCID: 0000-0002-8007-0732

## 1. Введение

При восстановлении пар трения, посадочных мест и других поверхностей ответственных механизмов методом электроискровой обработки хорошо зарекомендовали себя электродные материалы из меди и сплавов на ее основе. Лучшие технологические параметры по массопереносу и приросту покрытия по толщине при электроискровой обработке наблюдались у бронзы марки БрКМцЗ-1 [1, 2]. В то же время, результаты по использованию электродных материалов при электроискровой обработке на основе спеченных мелкодисперсных и нанопорошковых материалов на основе меди в технической литературе практически отсутствуют или освещены не в полной мере. Известно, что применение дисперсных наполнителей позволяет обеспечить необходимые физико-механические характеристики композиций, тем самым позволяя расширить диапазон применения новейших материалов [3]. Одним из методов получения мелкодисперсных и наноразмерных порошковых материалов является электроэрозионное диспергирование. Выполняя функции рециклинга, процесс электроэрозионного диспергирования позволяет создать порошки из любых токопроводящих материалов, и тем самым образовывать заданные композиции [4, 5].

Произведя процесс спекания мелкодисперсных и наноразмерных порошковых материалов по технологии искрового плазменного спекания Spark Plasma Sintering получают монолитные изделия, пригодные для дальнейшего использования в качестве электродных материалов. Особенность такого

спекания заключается в том, что композитные материалы обрабатываются с высокой степенью плотности с высокой однородностью и особо прочными связями, возникающими между частицами – происходит искровое плазменное сваривание частиц (локальная температура составляет до 10000 °С) в вакууме [6].

Таким образом, изучение современных материалов, обладающих новыми и относительно малоизученными свойствами, полученных спеканием мелко- и нанодисперсных порошков из электроэрозионных материалов, является важной задачей исследований как перспективного электродного материала для электроискровой обработки. Выбор оптимального режима электроискровой обработки, непосредственно влияющего на перенос материала электрода и оказывающего влияние на формирование покрытия на поверхности детали так же актуален для электроискровой обработки.

## 2. Цель исследования

Цель исследования заключается в выборе оптимальных режимов электроискровой обработки стальных деталей электродом из спеченной бронзы, полученной методом электроэрозионного диспергирования из отходов машиностроительных производств, изучение степени приращения массы образца (покрытия) после электроискровой обработки поверхности при изменении технологических параметров обработки.

### 3. Материалы и методы

Электродный материал был получен по технологии искрового плазменного спекания из порошка бронзы, диспергируемого в дистиллированной в воде. В основе спекаемого порошка – отходы бронзы марки БрАЖ9-4, составляющие до 95 % от общего состава, остальное – примеси меди марки М1 и бронзы марки БрКМц3-1. Размеры частиц по-

рошкового материала 0,071 мм и менее. Спекание осуществлялось при температуре 910 °С в течение 5 мин и давлении 40 МПа в вакууме при постепенном увеличении температуры и давления с последующим постепенным их снижением. После спекания брикет из бронзы разрезался на элементы размером 6×6×30 мм. Элементный состав электрода представлен в табл. 1.

Таблица 1

Элементный состав электрода

Элементы									
Al	Si	Ti	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Sn	Pb
4,42± 0,30	0,353± 0,047	0,109± 0,004	0,132± 0,007	1,41± 0,01	0,158± 0,007	82,57± 0,27	10,21± 0,05	0,134± 0,006	0,284± 0,011

В качестве образцов для наплавки использовались стальные образцы из стали 40 размером 14×14×40 мм (рис. 1).

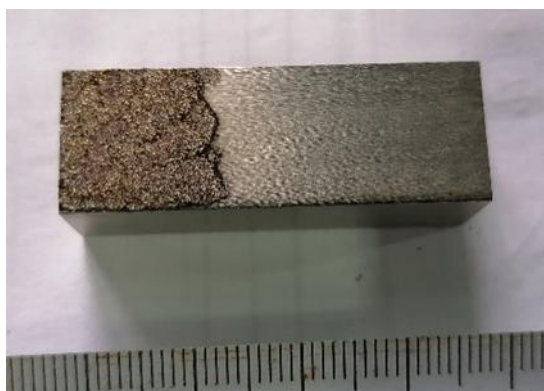


Рис. 1. Стальной образец (сталь 40), обработанный электроискровой обработкой электродом из спеченной бронзы

В работе использовалась установка для электроискровой обработки мод. «Вестрон» тип АИ-007 (рис. 2), весы аналитические Acculab ALC-210d4 (предел взвешивания – 210 г, дискретность - 0,0001 г, класс – I специальный), микрометр МГ Н25 ГОСТ 6507-90.

### 4. Результаты и обсуждение

Покрyтия из спеченной бронзы наносились на образцы в соответствии с режимами, представленными в табл. 2 при времени за-



Рис. 2. Общий вид установки для электроискровой обработки поверхности деталей «Вестрон» тип АИ-007

держки разрядного импульса равного  $0,7 \text{ мкс} \pm 10\% = \text{const}$ . Количество партий образцов три – в соответствии с частотой импульсов (100, 150, 300 Гц), выдаваемых установкой и которые являются постоянными для каждой партии образцов.

На каждую площадку образца размером 14×14 мм наносилось 3 слоя покрытия. Время обработки при нанесении каждого слоя соответствовало:  $t_1 = \tau$ ,  $t_2 = 2\tau$ ,  $t_3 = 2\tau$  с. Время обработки  $\tau$  определялось как время нанесения сплошного покрытия, полученного электроискровой обработкой на площадке заданного размера для каждого режима обработки. Таким образом, суммарное время

Таблица 2

Режимы опытной электроискровой обработки стальных образцов электродами из спеченной электроэрозионной бронзы

Емкость, мкФ	Рабочее напряжение $U$ на накопительных конденсаторах ( $B \pm 20\%$ ) и рабочий ток $I$ ( $A \pm 30\%$ ) по режимам напряжения					
	1		2		3	
	$U$	$I$	$U$	$I$	$U$	$I$
180	165	7,0	165	9,0	215	9,0
240	150	8,5	165	11	210	12
300	135	9,5	160	13	205	13
360	120	12	155	15	200	14

обработки площадки на одном режиме при полном цикле обработки составило  $t_{\Sigma} = 5\tau$  с [7].

Для установления достоверной оценки при подборе оптимальных режимов нанесения покрытий электроискровой обработкой был проведен многофакторный эксперимент. Анализ получаемой модели выявляет параметры оптимизации исследуемых факторов, тем самым позволяет проконтролировать принятую оценку погрешности косвенных измерений при проведении экспериментальных исследований. В то же время, ввиду дискретности параметров, задаваемых установкой электроискровой обработки, осуществить на практике выполнение данной математической модели проблематично. По

этой причине, были проведены серии прямых экспериментов, которые позволили дать оценку наносимым покрытиям [11].

Результаты опытной электроискровой обработки стальных образцов электродами из спеченной электроэрозионной бронзы позволили провести оценку и степень влияния на перенос материала электрода, приращение образца по массе в граммах  $\Delta m$  и по толщине в миллиметрах  $\Delta t$  в зависимости от изменения характеристик  $f_{разр}$  (частота импульсов, Гц),  $U_{разр}$  (напряжение разряда, В),  $C_{разр}$  (емкость заряда, мкФ) (рис. 3-8).

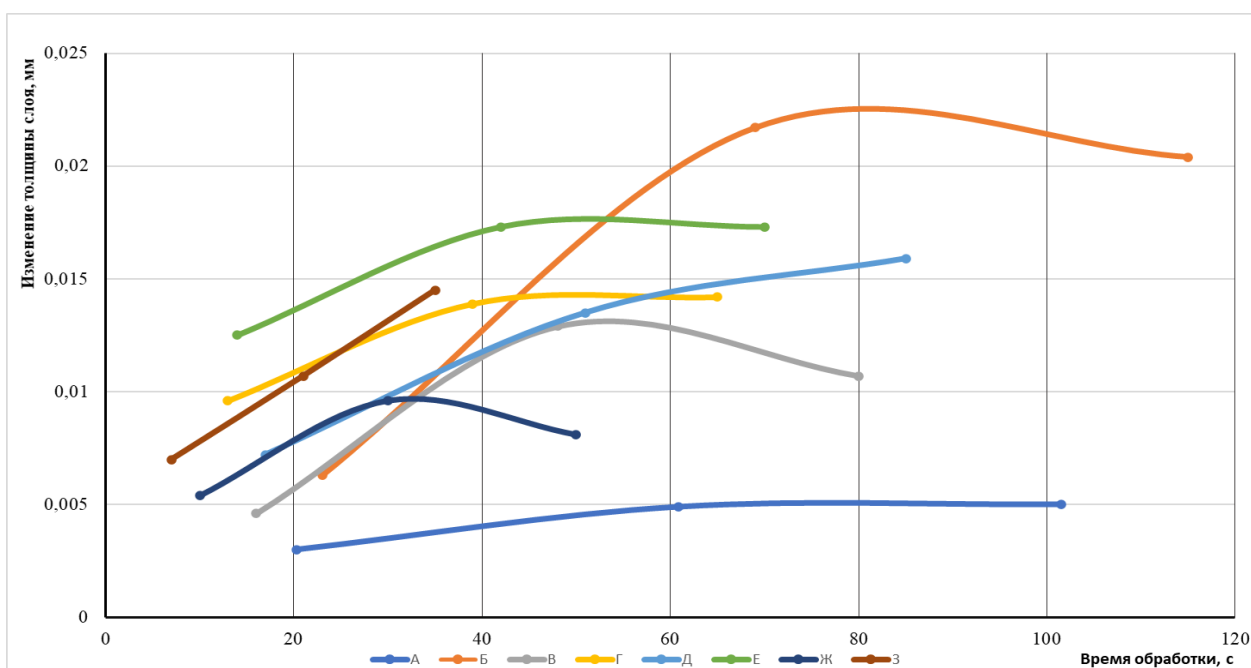


Рис. 3. Изменение толщины покрытия при  $f_{разр} = 100$  Гц (const)

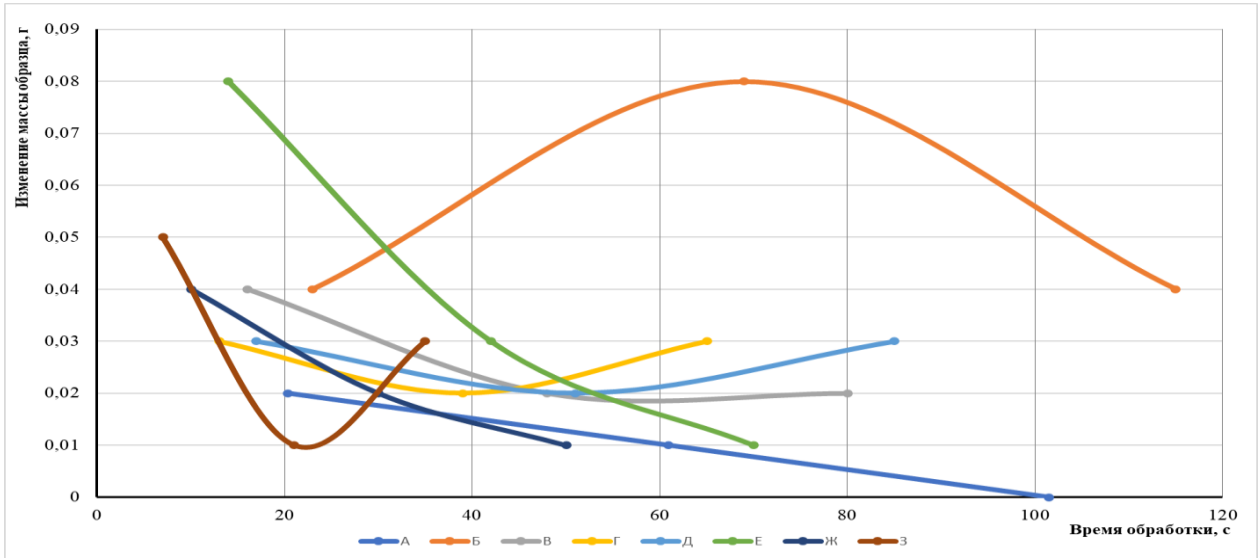


Рис. 4. Изменение массы образца при  $f_{разр} = 100 Гц(const)$

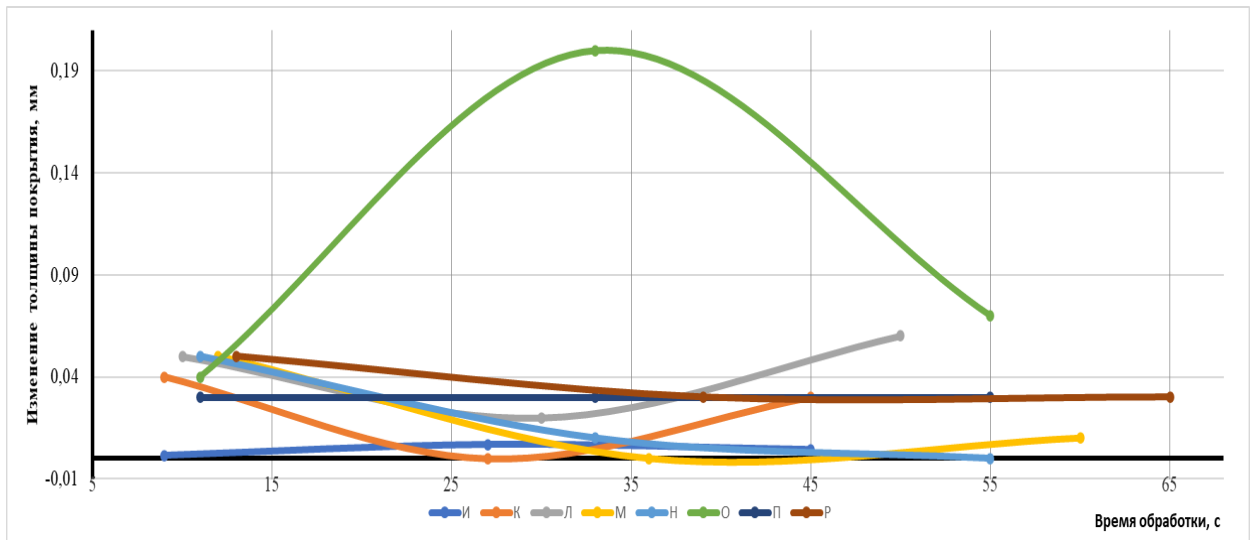


Рис. 5. Изменение толщины покрытия при  $f_{разр} = 150 Гц(const)$

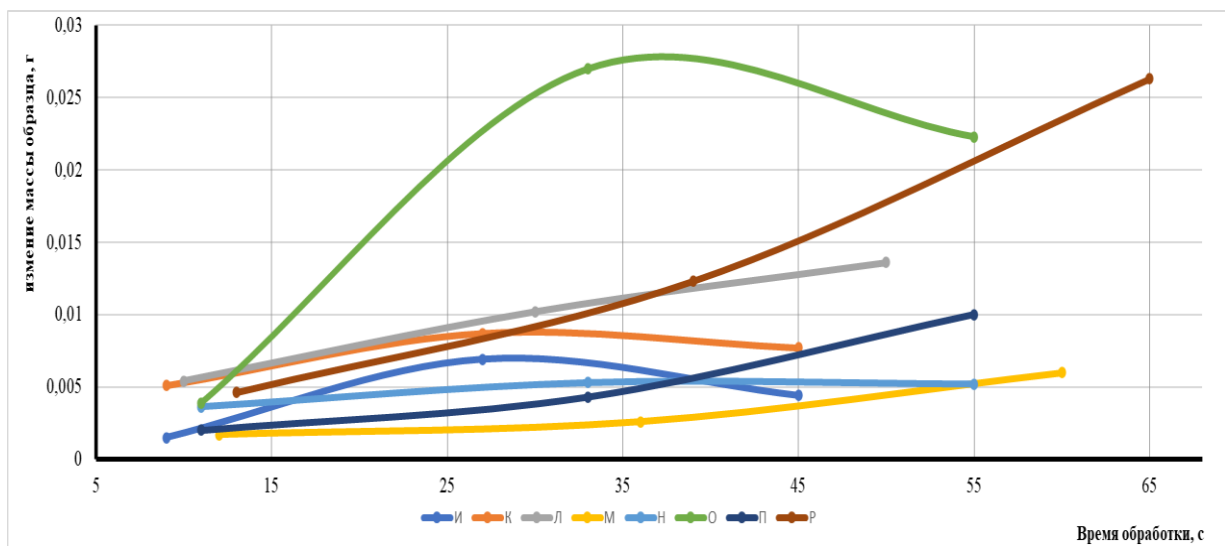


Рис. 6. Изменение массы образца при  $f_{разр} = 150 Гц(const)$

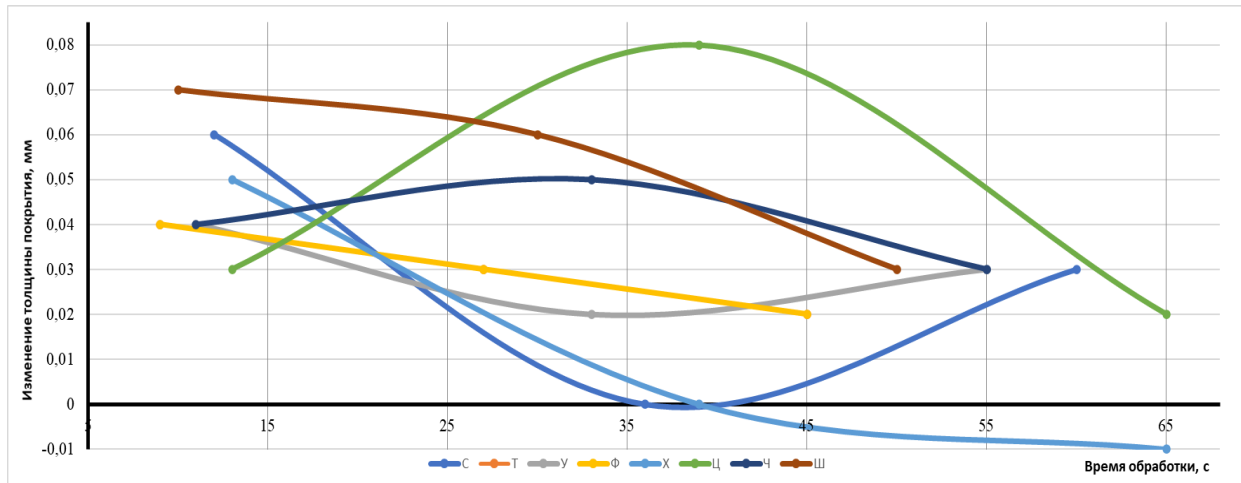


Рис. 7. Изменение толщины покрытия при  $f_{разр} = 300 \text{ Гц} (const)$

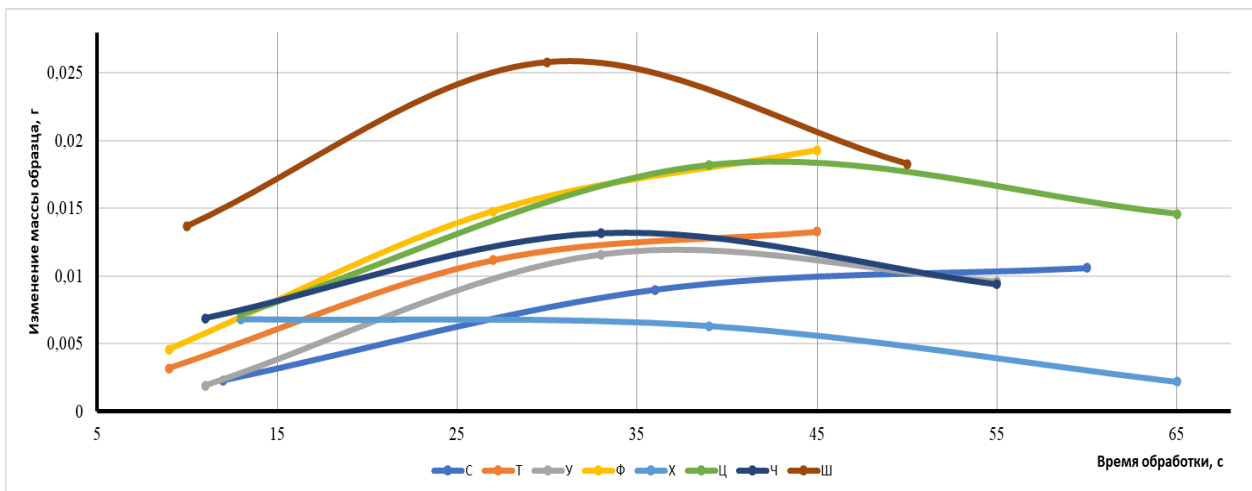


Рис. 8. Изменение массы образца при  $f_{разр} = 300 \text{ Гц} (const)$

Обработав полученные данные при помощи пакета программ статистической обработки данных Statistica 6.1 для каждого из исследуемого параметра  $\Delta m$  и  $\Delta t$  в зависимости от изменения характеристик  $f_{разр}$ ,  $U_{разр}$  и  $C_{разр}$ , были составлены уравнения регрессии. По результатам испытаний построены поверхности отклика  $U_{разр}-C_{разр}-\Delta m$  и  $U_{разр}-C_{разр}-\Delta t$  при  $f_{разр}$  100; 150 и 300 Гц. Поверхности отклика в рамках одних частот показали идентичное строение. Поверхности отклика и  $U_{разр}-C_{разр}-\Delta t$  при  $f_{разр}$  100; 150 и 300 Гц представлены на рис. 9-11.

При сравнительном анализе поверхностей отклика при частотах импульса  $f_{разр}$  100, 150 и 300 Гц заметна схожесть поверхностей. Видно, что максимальные значения

приращения по массе и толщине покрытия на стальных образцах наблюдались при малых значениях амплитуды разряда  $U_{разр}$ . Увеличение амплитуды разрядов способствует монотонному снижению массы и толщины покрытия, в интервале 180...200 В при частотах импульса 150 и 300 Гц прироста толщины покрытия и массы образца не наблюдается и имеют нулевые значения. При частоте импульсов 100 Гц присутствуют отрицательные значения прироста массы и толщины, т.е. наблюдается эрозия покрытия. Однако увеличение зарядной емкости при частоте импульсов  $f_{разр}$  100 Гц способствует некоторому увеличению массы и толщины покрытия, в то время как при частотах импульса  $f_{разр}$  150 и 300 Гц наблюдается снижение данных параметров.

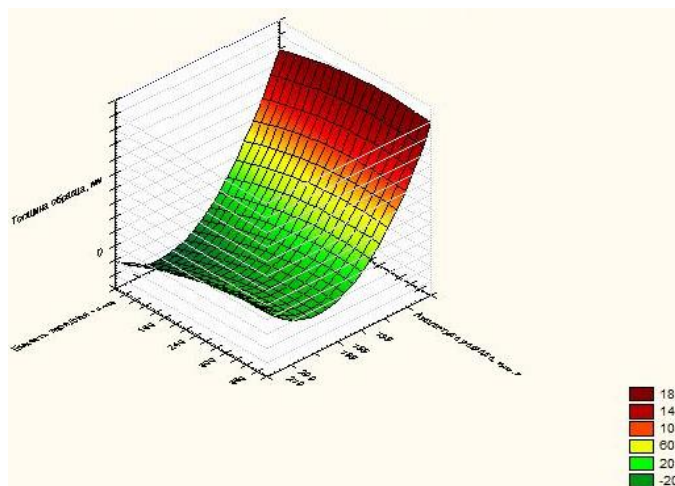


Рис. 9. Поверхность отклика  $U_{разр} - C_{разр} - \Delta t$  при  $f_{разр} = 100 \text{ Гц}$

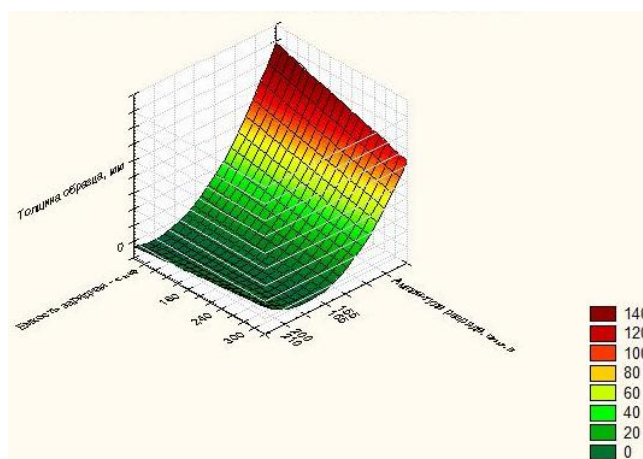


Рис. 10. Поверхность отклика  $U_{разр} - C_{разр} - \Delta t$  при  $f_{разр} = 150 \text{ Гц}$

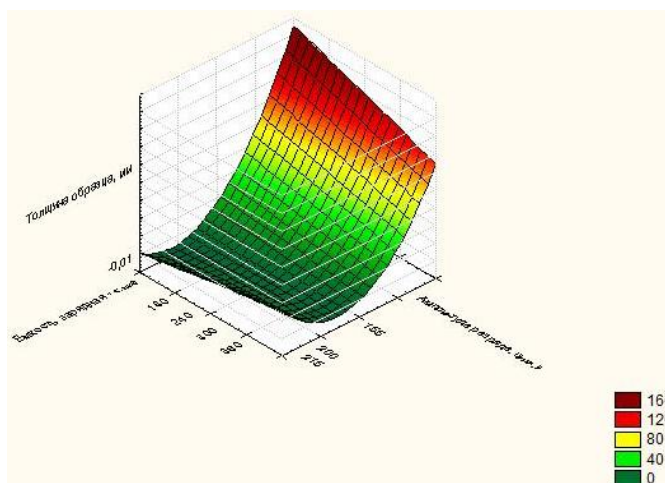


Рис. 11. Поверхность отклика  $U_{разр} - C_{разр} - \Delta t$  при  $f_{разр} = 300 \text{ Гц}$

Исходя из вышеизложенного, наилучшие показатели по массопереносу и толщине полученного покрытия наблюдаются:

- при частоте импульса  $f_{разр}$  100 Гц, амплитуде разряда  $U_{разр}$  от 1 до 180 В и емкости заряда  $C_{разр}$  от 240 до 360 мкФ;

- при частоте импульса  $f_{разр}$  150 Гц, амплитуде разряда  $U_{разр}$  от 1 до 140 В и емкости заряда  $C_{разр}$  от 1 до 250 мкФ;

- при частоте импульса  $f_{разр}$  300 Гц, амплитуде разряда  $U_{разр}$  от 1 до 150 В и емкости заряда  $C_{разр}$  от 1 до 240 мкФ.

Ввиду дискретности параметров, задаваемых установкой электроискровой обработки производить наплавку при частотах импульса 150 и 300 Гц выявленных оптимальных параметрах, не представляется возможным. Таким образом, оптимальным режимом для электроискровой наплавки стальных образцов электродами из спеченной электроэрозионной бронзы является режим со следующими параметрами: частота импульса  $f_{разр} = 100$  Гц, амплитуда разряда  $U_{разр}$  от 1 до 180 В и емкость заряда  $C_{разр}$  от 240 до 360 мкФ. В данные параметры укладывается условный режим «Д», имеющий значения амплитуды раз-

ряда  $U_{разр} = 160$  В, емкости заряда  $C_{разр} = 300$  мкФ, частоты импульса  $f_{разр} = 100$  Гц, рабочего тока  $I_p = 13$  А.

## 5. Выводы

В результате проведенных исследований по выбору режимов электроискровой обработки на установке мод. «Вестрон» тип АИ-007 стальных образцов электродами из спеченной бронзы, полученной методом электроэрозионного диспергирования из отходов машиностроительных производств, определено следующее: наиболее постоянно и без потерь осуществлялся процесс переноса материала на поверхность образца на условном режиме «Д» при  $U_{разр} = 160$  В,  $C_{разр} = 300$  мкФ,  $f_{разр} = 100$  Гц,  $I_p = 13$  А. Такой режим электроискровой обработки обеспечивает требуемое качество и толщину покрытия при восстановлении неподвижных соединений.

## Список литературы

1. Иванов В.И. Электроискровое легирование при производстве, обслуживании и ремонте техники: перспективы // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 122. С. 133-139.
2. Иванов В.И. Об использовании и развитии метода электроискрового легирования в России // Труды ГОСНИТИ. 2018. Т. 130. С. 196-207.
3. Верхотуров А.Д., Иванов В.И., Прядко Л.Ф., Коневцов Л.А. Электродные материалы при ЭИЛ: влияние на эрозию и свойства легированного слоя и критерии оценки эффективности // Технический сервис машин. 2018. Т. 131. С. 209-222.
4. Агеева Е.В., Зубарев М.В. Установка для получения порошковых материалов, пригодных для технологических процессов восстановления и упрочнения деталей // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 129. С. 169-173.
5. Агеев Е.В., Агеева Е.В., Хорьякова Н.М., Малюхов В.С. Возможность переработки медных отходов в порошки электроэрозионным диспергированием // Технические науки – от теории к практике.

## References

1. Ivanov V.I. Electrospark alloying in the production, maintenance and repair of equipment: prospects. *Trudy GOSNITI*, 2016, Vol. 122, pp. 133-139. (In Russian).
2. Ivanov V.I. On the use and development of the method of electrospark alloying in Russia. *Trudy GOSNITI*, 2018, Vol. 130, pp. 196-207. (In Russian).
3. Verhoturov A.D., Ivanov V.I., Pryadko L.F., Konevcov L.A. Electrode materials for ESA: influence on erosion and properties of the alloyed layer and criteria for evaluating efficiency. *Tekhnicheskij servis mashin*, 2018, Vol. 131, pp. 209-222. (In Russian).
4. Ageeva E.V., Zubarev M.V. Installation for obtaining powder materials suitable for technological processes of restoration and strengthening of parts. *Trudy GOSNITI*, 2017, Vol. 129, pp. 169-173. (In Russian).
5. Ageev E.V., Ageeva E.V., Hor'yakova N.M., Malyuhov V.S. Possibility of processing copper waste into powders by electroerosive dispersion. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike*, 2014, No.32, pp. 50-55. (In Russian).



2014. №32. С. 50-55.

6. Сяменчик Т.А., Матренин С.В. Получение опытных образцов из нанодисперсных порошков методом искрового плазменного спекания // Современные проблемы машиностроения: Сб. научн. тр. VII Междуна. научно-техн. конф. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2013. С. 131-135.

7. Иванов В.И., Костюков А.Ю. Электроискровое нанесение покрытий // РИТМ машиностроения. 2016. № 10. С. 36-43.

8. Кудряшова Е.Ю., Шемберев И.А., Задорожний Р.Н. Наноструктурирование поверхностного слоя методом электроискрового легирования // Технический сервис машин. 2020. № 1 (138). С. 113-121.

9. Задорожний Р.Н., Кудряшова Е.Ю., Решиков Е.О. Структура поверхностного слоя малоуглеродистой стали после электроискровой обработки // Молодежь и XXI век-2019: Мат. IX Междунар. молодежной научн. конф. 2019. С. 108-111.

10. Романов И.В., Задорожний Р.Н., Мартиросян А.Т. Исследование гранулометрического состава, формы и морфологии частиц бронзового порошка, полученного методом электроэрозионного диспергирования // Инновационные технологии реновации в машиностроении: Сб. тр. Междунар. научно-техн. конф., посв. 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. М. 2019. С. 265-268.

11. Коротаев Д.Н., Иванова Е.В. Математическое моделирование структурно-энергетического состояния поверхности при электроискровом легировании // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 7. № 3 (24). С. 42-47.

6. Syamenchik T.A., Matrenin S.V. Production of prototypes from nanodispersed powders by the method of spark plasma sintering. In: *Sovremennye problemy mashinostroeniya. Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnyj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii.* Tomsk, Natsionalnyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskij universitet, 2013, pp. 131-135. (In Russian).

7. Ivanov V.I., Kostyukov A.YU. Electrospark coating. *RITM mashinostroeniya*, 2016, No.10, pp. 36-43. (In Russian).

8. Kudryashova E.YU., SHemberev I.A., Zadorozhnyj R.N. Nanostructuring of the surface layer by electrospark alloying. *Tekhnicheskij servis mashin*, 2020, No.1 (138), pp. 113-121. (In Russian).

9. Zadorozhnyj R.N., Kudryashova E.YU., Reshchikov E.O. Structure of the surface layer of mild steel after electrospark treatment. In: *Molodezh i XXI vek-2019: Materialy IX Mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii*, 2019, pp. 108-111. (In Russian).

10. Romanov I.V., Zadorozhnyj R.N., Martirosyan A.T. Investigation of the particle size distribution, shape and morphology of particles of bronze powder obtained by the method of electroerosive dispersion. V sbornike: *Innovacionnye tekhnologii renovacii v mashinostroenii.* In: *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchyonnoy 150-letiyu fakulteta «Mashinostroitelnye tekhnologii» i kafedry «Tekhnologii obrabotki materialov» MGTU im. N.E. Baumana.* Moscow, 2019, pp. 265-268. (In Russian).

11. Korotaev D.N., Ivanova E.V. Mathematical modeling of the structural and energy state of the surface during electrospark alloying. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, 2017, Vol. 7, No.3(24), pp. 42-47. (In Russian).

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> 25.03.2021 г.