



# *Научно-технический вестник*

БРЯНСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

*Nauchno-Tekhnicheskiy Vestnik  
Bryanskogo Gosudarstvennogo  
Universiteta*

Б Р Я Н С К

---

2023(1)

ISSN 2413-9920

**Научно-технический  
ВЕСТНИК  
Брянского  
государственного  
университета**

**№ 1  
2023**

**Nauchno-tehnicheskij**  
**VESTNIK**  
**Bryanskogo**  
**gosudarstvennogo**  
**universiteta**

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

**№ 1**  
**2023**

ББК 74.580.4

Н-34

Научно-технический вестник Брянского государственного университета. № 1 (2023). Брянск: РИСО БГУ, 2023. – Точка доступа: <http://ntv-brgu.ru>  
Размещено на официальном сайте журнала: 25.03.2023

Решением Высшей Аттестационной комиссии при Минобрнауки России с 07 марта 2023 г. сетевое издание «Научно-технический вестник Брянского государственного университета» включено 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:

2.5.2 – Машиноведение (технические науки);

2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки);

2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)

Решением Высшей Аттестационной комиссии при Минобрнауки России (письмо от 06 декабря 2022 г. № 02-1198) сетевое издание «Научно-технический вестник Брянского государственного университета» отнесено к категории К2

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

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

#### **Главный редактор сетевого издания:**

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

#### **Ответственный секретарь сетевого издания:**

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

#### **Редакционная коллегия сетевого издания:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Chief editor:**

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

**Executive secretary:**

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

**Editorial Board:**

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

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

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

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

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

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

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

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

*I.A. 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, 2023  
© 2023 Nauchno-tehnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta



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

## СОДЕРЖАНИЕ

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

**Машиноведение, наземные транспортно-технологические средства и процессы**

*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 2.5.2; 2.5.11; 2.5.21*

*Статьи, опубликованные в этом разделе, соответствуют требованиям к журналам категории К2 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 (Информационное письмо ВАК при Минобрнауки России от 06.12.2022 № 02-1198)*

*Степченко Т.А., Бабич О.В. (Брянск, Россия)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-9-27*

Результаты научных исследований Брянского государственного университета в 2022 году в сфере создания мобильных канатных дорог и лесных канатных машин на базе самоходных колесных шасси ..... 9

*Гнездилов С.Г. (Москва, Россия)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-28-38*

Применение топологической оптимизации при проектировании элементов грузозахватных устройств ..... 28

*Горелова М.В., Сладкова Л.А. (Москва, Россия)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-39-48*

Методология выявления и оценка значимости факторов, влияющих на аварийность грузоподъемных кранов ..... 39

*Далида Н.В., Филькин Н.М., Скуба Д.В. (Ижевск, Россия)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-49-58*

Методические аспекты создания рам маломощных транспортных средств (квадроциклов) на основе трубчатых профилей ..... 49

*Денисов И.А. (Брянск, Россия)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-59-70*

Экспериментальное исследование деформированного состояния металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа с универсальной компоновочной схемой ..... 59

*Новиков В.И. (Санкт-Петербург, Россия)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-71-78*

Влияние теплопроводности материалов контактных поверхностей на тепловой баланс элементов гидросъемника для струйной цементации грунтов ..... 71

*Панфилов А.В., Николаев Н.Н., Хван Р.В., Короткий А.А. (Ростов-на-Дону, Россия)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-79-86*

Оценка возможных аварий канатных дорог по компетенциям работников с использованием нейронных сетей ..... 79

*Панфилов А.В., Юсупов А.Р., Гавриков М.М., Синецкий Р.М. (Ростов-на-Дону,  
Новочеркасск, Россия)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-87-100*

Алгоритмизация задачи видеоскопического контроля состояния стальных канатов ..... 87

*Таричко В.И., Лагерева И.В. (Санкт-Петербург, Брянск, Россия)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-101-111*

Анализ альтернативных вариантов однопролетных мобильных канатных дорог на базе самоходных шасси ..... 101

*Химич А.В. (Брянск, Россия)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-112-120*

Оценка прочности опоры анкерного каната машины для лесозаготовки на склоне ..... 112

## CONTENT

## ENGINEERING SCIENCE

**Machinery, ground transportation and technological means and processes**

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 2.5.2; 2.5.11; 2.5.21

The articles published in this section meet the requirements for journals of category K2 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 (Information letter of the Higher Attestation Commission under the Ministry of Education and Science of Russia of December 6, 2022 No. 02-1198)

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

DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-9-27

The results of Bryansk State University scientific research in 2022 in the field of creation of mobile ropeways and forest rope units based on self-propelled wheeled chassis ..... 9

*Gnezdilov S.G. (Moscow, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-28-38

Application of topology optimization in the design of elements of load handling devices ..... 28

*Gorelova M.V., Sladkova L.A. (Moscow, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-39-48

Methodology for identifying and assessing the significance of factors affecting the accident rate of cranes ..... 39

*Dalida N.V., Filkin N.M., Scuba D.V. (Izhevsk, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-49-58

Methodological aspects of creating frames for low-power vehicles (ATVS) based on tubular profiles ..... 49

*Denisov I.A. (Bryansk, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-59-70

Experimental study of the deformed state of metal structures of load trolleys of overhead cranes with a multipurpose layout drawing ..... 59

*Novikov V.I. (Saint-Petersburg, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-71-78

The effect of the thermal conductivity by the materials of contact surfaces on the heat balance of the jet-grouting drill stem hydraulic elements ..... 71

*Panfilov A.V., Nikolaev N.N., Khvan R.V., Korotkiy A.A. (Rostov-on-Don, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-79-86

Assessment of possible cable car accidents by employee competencies using neural networks ..... 79

*Panfilov A.V., Yusupov A.R., Gavrikov M.M., Sinetsky R.M. (Rostov-on-Don, Novocheerkassk, Russian Federation)*

DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-87-100

Algorithmization of the problem of videoscopic evaluation of the steel ropes state ..... 87



*Tarichko V.I., Lagerev I.A. (Saint-Petersburg, Bryansk, Russian Federation)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-101-111*

Alternative variants analysis of single-span mobile ropeways based on self-propelled chassis ..... 101

*Khimich A.V. (Bryansk, Russian Federation)*

*DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-01-112-120*

The strength assessment of the anchor rope support of the machine for logging on the slope ..... 112

УДК (UDC) 608.4

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

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

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

**Дата принятия к публикации:** 01.03.2023

**Дата публикации:** 25.03.2023

**Сведения об авторах:**

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

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

ORCID: 0000-0003-1954-1475

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

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

**Date of acceptance for publication:** 01.03.2023

**Date of publication:** 25.03.2023

**Authors' information:**

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

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

ORCID: 0000-0003-1954-1475

## 1. Введение

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

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

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

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

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

технологии и комплексы безопасной урбанизированной среды» [6].

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

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

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

## 2. Исследования в области мобильных канатных дорог

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

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

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

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

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

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

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

- трассу мобильной канатной дороги (величина пролета между конечными точками, минимальный вертикальный габарит приближения транспортируемого груза к посторонним предметам, длина концевой опоры мобильного канатного комплекса);
- профиль поверхности в месте расположения мобильной канатной дороги (угол наклона к горизонтальной плоскости прямой, проходящей через центры канатных шкивов сопряженных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов);
- транспортируемый груз (вес, вертикальный и горизонтальный габарит, расчетная площадь);
- ветровое воздействие на канатную систему и транспортируемый груз (нормативное значение ветрового давления, направление ветра относительно направлению перемещения груза).

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

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

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

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

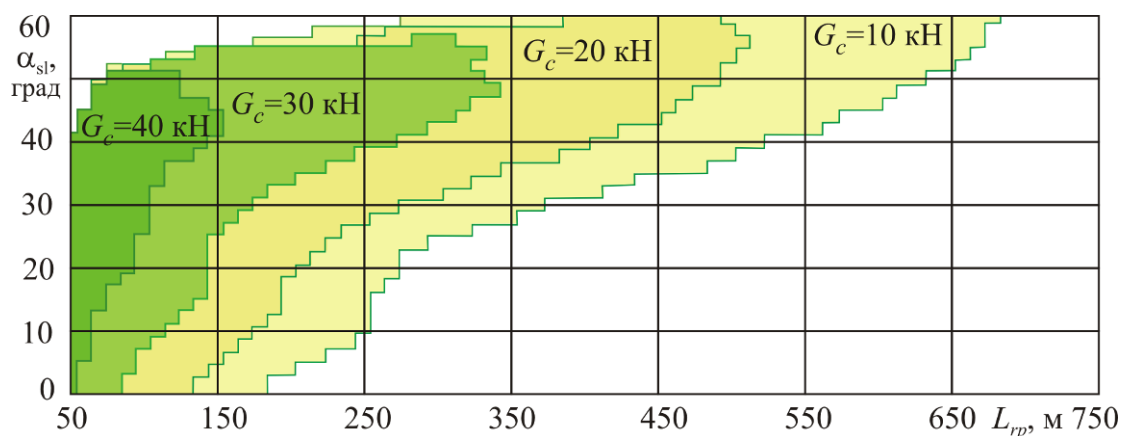


Рис. 1. Пример грузо-пространственных характеристик, определяющих области возможного использования конкретного варианта мобильной канатной дороги, для нескольких дискретных значений веса транспортируемого груза  $G_c$

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

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

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

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

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

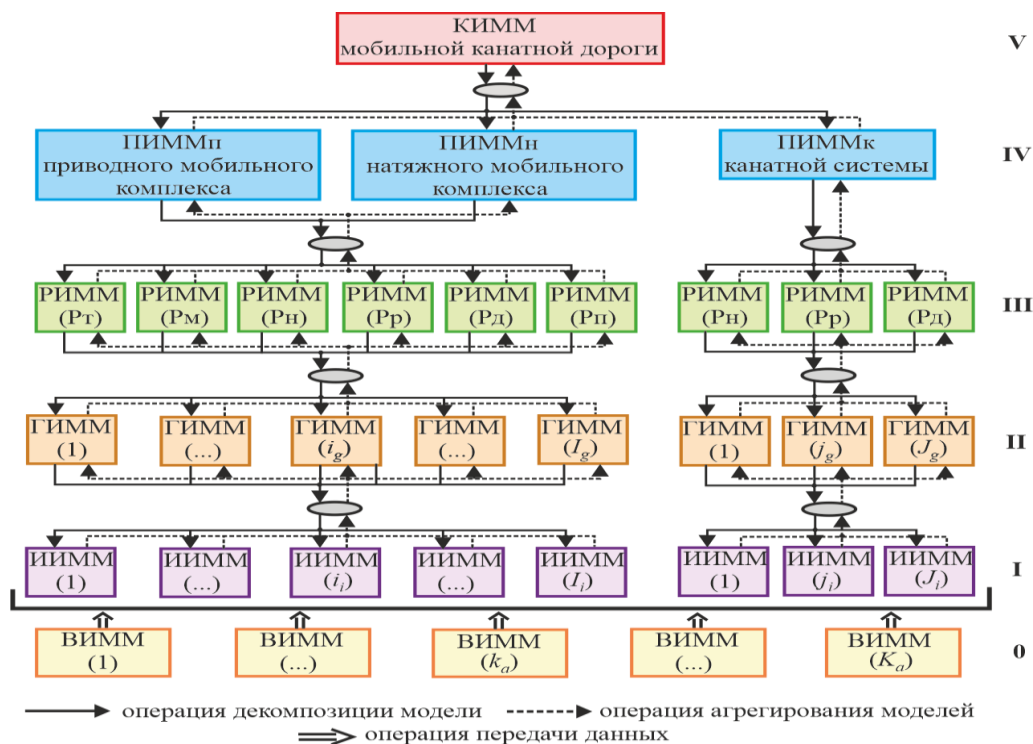


Рис. 2. Структура цифрового двойника мобильной канатной дороги [24]

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3. Исследования в области аэромобильных канатных дорог

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

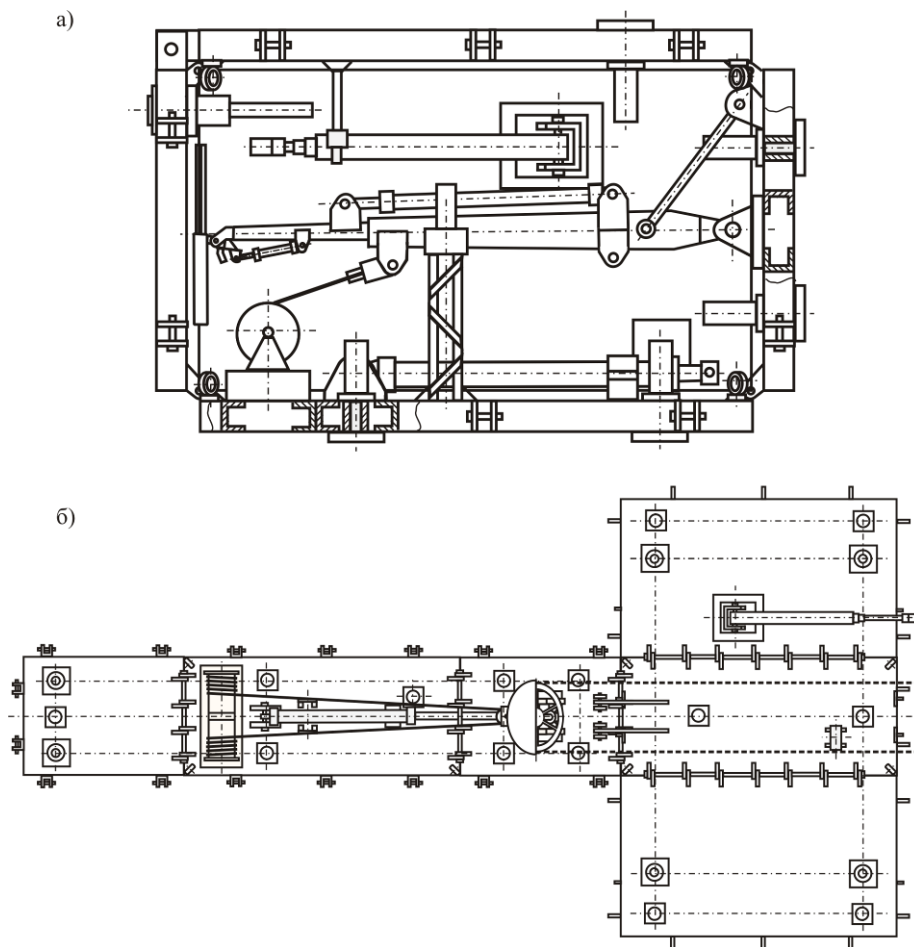


Рис. 3. Общий вид быстромонтируемой аэромобильной канатной дороги контейнерного конструктивного исполнения [33]: а – транспортное положение, вид сбоку; б – рабочее положение, вид сверху

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

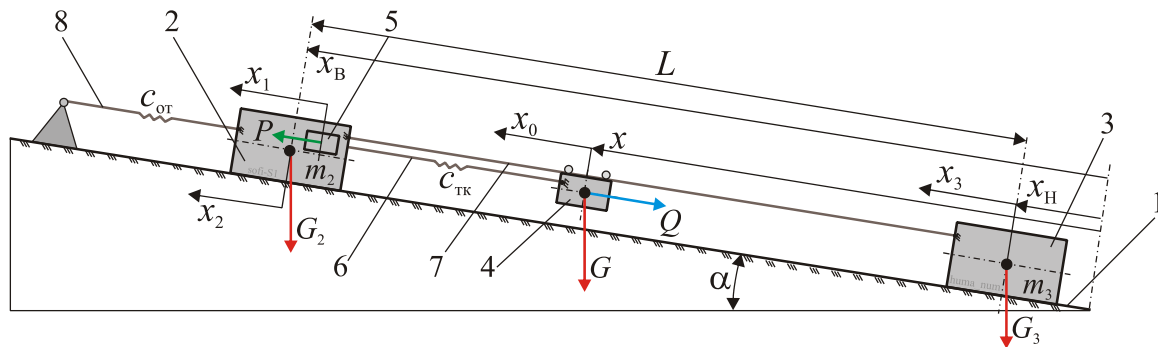


Рис. 4. Расчетная схема канатной транспортно-технологической машины с оттяжкой [47]:  
1 – склон; 2 – верхняя базовая станция (модуль); 3 – нижняя базовая станция (модуль);  
4 – рабочий орган; 5 – лебедка; 6 – тяговый канат; 7 – несущий канат; 8 – оттяжка

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

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

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

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

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

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

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

## 5. Заключение

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

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

### Список литературы

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

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

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

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

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

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

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

### References

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

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

3. Stepchenko T.A., Babich O.V. Results of scientific research of Bryansk State University in the sphere of mobile transportation and handling rope systems and ropeways. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No.1, pp. 9-29. DOI: 10.22281/2413-9920-2021-07-01-09-29. (In Russian)

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

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

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

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

2022. 207 с.

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

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

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

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

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

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

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

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

16. Моделирование рабочих процессов канатной машины для лесозаготовки на

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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





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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

УДК (UDC) 621.86/.87

ПРИМЕНЕНИЕ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ  
ЭЛЕМЕНТОВ ГРУЗОЗАХВАТНЫХ УСТРОЙСТВAPPLICATION OF TOPOLOGY OPTIMIZATION IN THE DESIGN  
OF ELEMENTS OF LOAD HANDLING DEVICESГнездилов С.Г.  
Gnezdilov S.G.Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Москва, Россия)  
Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russian Federation)

**Аннотация.** В статье приведены методические рекомендации по выполнению концептуальной топологической оптимизации. Под «концептуальной» понимается оптимизация, результатом которой является не конкретное конструктивное решение, а рациональная топология – структура, наилучшим образом передающая заданные силовые потоки. В соответствии с упомянутыми рекомендациями предлагается оптимизацию проводить в последовательности: определение объекта исследования, поиск точек приложения внешних сил к объекту и обоснование (при необходимости) их наиболее рационального относительного расположения, определение характера внешних сил в точках их приложения, наложение связей, учет иных факторов и анализ результатов с возможным уточнением результатов. Особое внимание уделено вопросу построения расчетной схемы для топологической оптимизации, от которой, по мнению автора, во многом определяется успешность решения задачи. Приведенные в статье рекомендации апробированы на практическом примере, в котором рассмотрен порядок оптимизации рычага грузового захвата. Такой захват имеет сложный характер нагружения, в связи с чем его наиболее рациональная структура не очевидна. А потому для поиска рационального конструктивного исполнения его элементов целесообразно применение концептуальной топологической оптимизации. Оптимизация позволила уменьшить массу рычага такого захвата на 42%. При этом прочность нового решения увеличилась на 15%, а жесткость возросла на 49%.

**Ключевые слова:** топологическая оптимизация, конструирование, грузовой захват, конечно-элементный анализ.

**Дата принятия к публикации:** 23.11.2022  
**Дата публикации:** 25.03.2023

**Сведения об авторах:**

**Гнездилов Сергей Геннадьевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Подъемно-транспортные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, e-mail: gnezdilov@bmstu.ru.  
ORCID: 0000-0002-3215-3840

**Abstract.** The article provides guidelines for the implementation of conceptual topology optimization. By "conceptual" is meant optimization, the result of which is not a specific design solution, but a rational topology – a structure that best transmits the given force flows. In accordance with the above recommendations, it is proposed to carry out optimization in the following sequence: determining the object of study, searching for points of application of external forces to the object and substantiating (if necessary) their most rational relative location, determining the nature of external forces at the points of their application, applying connections, taking into account other factors and analysis of the results with their possible refinement. Particular attention is paid to the issue of constructing a loading diagram for topology optimization, which, in the author's opinion, largely determines the success of solving the problem. A correctly prepared loading diagram should take into account all the most unfavorable combinations of loads. Recommendations on the most rational construction of loading diagrams are given. The recommendations given in the article are tested on a practical example, which considers the procedure for optimizing the load grip lever. Such a grip has a complex nature of loading, and therefore its most rational structure is not obvious. Therefore, in order to search for a rational design of its elements, it is advisable to use conceptual topology optimization. Optimization made it possible to reduce the mass of the lever of such a grip by 42%. At the same time, the strength of the new solution increased by 15%, and the stiffness increased by 49%.

**Keywords:** topology optimization, construction design, load grip, finite element analysis.

**Date of acceptance for publication:** 23.11.2022  
**Date of publication:** 25.03.2023

**Authors' information:**

**Sergey G. Gnezdilov** – PhD (Eng), Associate Professor, Associate Professor of Department of Hoisting and Conveying Systems, Bauman Moscow State Technical University, e-mail: gnezdilov@bmstu.ru.  
ORCID: 0000-0002-3215-3840



## 1. Введение

При проектировании рациональных конструкций применяют топологическую оптимизацию, в которой условно можно выделить два направления. В первом случае оптимизация применяется для получения очертаний конкретной детали, топология которой имеет определенные размеры, известен ее материал, она нагружена известными силами, доступна информация о ее напряженно-деформированном состоянии и др. Результатом оптимизации является топология, опираясь на размеры которой может быть получена готовая деталь. Во втором случае оптимизация дает концептуальное решение, в котором мало конкретики: нет данных о материале, отсутствуют численные значения сил в привычных системах единиц измерений, абсолютные значения размеров не представляют интереса. При этом результатом оптимизации является не конкретное конструктивное решение, как в первом случае, а рациональная топология – структура, наилучшим образом передающая заданные силовые потоки.

Концептуальная топологическая оптимизация применима для решения разных задач. Отметим три основных направления. Первое направление – проверка существующих структур на оптимальность. Структуры окружающих нас объектов сформировались за многие годы и, кажется, здесь ничего нового не придумаешь, однако даже для весьма устоявшихся структур могут быть найдены более рациональные исполнения, которые потенциально могут иметь лучшие технические характеристики. Второе направление – разумное усиление существующих конструкций. Предположим, что имеется некоторый объект, который необходимо модернизировать: он должен быстрее ездить, поднимать более тяжелые грузы, иметь более высокие собственные частоты и т.п. В результате моделирования можно найти решение, которое позволило бы надлежащим образом усилить конструкцию с минимальными затратами. Третье направление – создание топологии для нового продукта: проектируется что-то совсем новое, а подходящие аналоги отсутствуют.

Концептуальная топологическая оптимизация реализована во многих находящихся в свободном доступе простых в использовании программах, в числе которых решение *TopOpt-2D*, доступное для установки как под *Windows*, так и на большинстве смартфонов и планшетов. В этой программе предусмотрен набор инструментов, позволяющий довольно гибко моделировать условия эксплуатации исследуемого объекта: действующие нагрузки и их различные сочетания, связи, области отсутствия материала и др. В процессе задания граничных условий программа в режиме реального времени формирует решение, обладающее максимальной жесткостью [16, 17].

Применение такого инструмента особенно эффективно при получении приближенных решений в «полевых» условиях, при обосновании или перепроверке конструктивных форм изделий и др. Удобство установки и использования, а также общедоступность программы, делают актуальным ее применение в учебном процессе [1, 18], что позволяет учащимся иначе взглянуть на вопросы расчета элементов машин: это подталкивает их к анализу работы исследуемых конструкций и выявлению факторов, в наибольшей степени влияющих на топологию проектируемого изделия, его напряженно-деформированное состояние, пониманию условий его эксплуатации, корректному заданию граничных условий в расчетных моделях. Такие навыки будут полезны, в частности, при решении задач конечно-элементного анализа.

Несмотря на относительную простоту такой программы, непосредственно познакомиться с которой может любой желающий, при решении конкретных практических задач для формирования корректных исходных данных от пользователя требуется специальная подготовка, основанная на понимании основных принципов работы моделируемого объекта. От исходных данных напрямую в значительной степени зависит результат топологической оптимизации, проверка которого также требует определенных навыков. В результате упущения некоторых случаев нагружения может быть получено решение,

непригодное для эксплуатации в заявленных условиях.

В публикациях, демонстрирующих результаты топологической оптимизации, часто не показывают использованные при оптимизации расчетные схемы [2–7], что, по мнению автора, является существенным упущением, поскольку составленная расчетная схема является важным научным результатом. Более того, подготовка исходных данных для топологической оптимизации является творческой работой, которая во многих случаях в значительной степени зависит от опыта проектировщика, а результаты решения одной и той же задачи разными людьми могут существенно отличаться. В других работах предлагаемые расчетные схемы представлены недостаточно подробно [8–14]. Настоящая публикация призвана продемонстрировать ряд рекомендаций по составлению расчетных схем при решении задач топологической оптимизации.

## 2. Порядок моделирования оптимальной топологии

Общий порядок моделирования оптимальной топологии представим следующим образом (рис. 1).

На начальном этапе следует определиться с объектом моделирования. Целесообразно проводить оптимизацию только отдельных деталей устройств. Наиболее актуальна оптимизация материалоемких изделий, характер нагружения которых неочевиден и ожидаемо имеет сложный вид. При этом необходимо иметь в виду, что некоторые программы не учитывают собственный вес оптимизируемого объекта, что в ряде случаев может отрицательно повлиять на результат оптимизации. В меньшей степени это актуально для деталей, вес которых существенно меньше передаваемой нагрузки (характерно для изделий из материалов с высокими механическими характеристиками).

Затем на подлежащей оптимизации детали намечаются характерные точки – точки приложения внешних сил, образующихся в результате взаимодействия исследуемой детали с другими элементами устройства,

внешними объектами для всех расчетных случаев нагружения. На данном этапе целесообразно на основе учета специфики работы устройства проверить рациональность относительного расположения намеченных характерных точек для обеспечения его наилучших эксплуатационных характеристик.

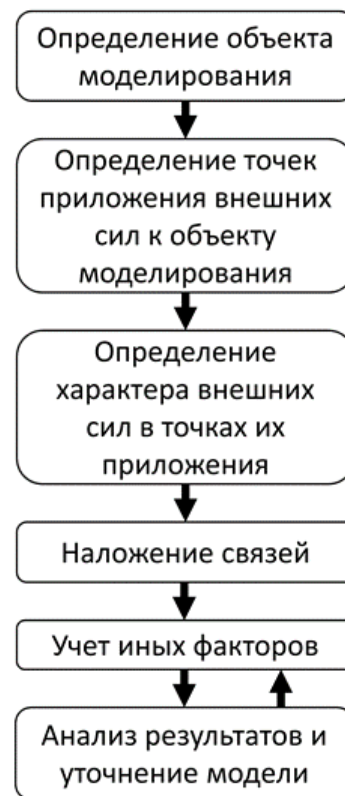


Рис. 1. Алгоритм моделирования деталей

На следующем этапе уточняются параметры внешних сил, воздействующих на исследуемую деталь в характерных точках: их направление и величина. В большинстве характерных точек эти параметры могут быть определены по ряду признаков без дополнительных вычислений. При определении значений силовых факторов и направлений их действия обычно не требуется повышенная точность, которая, как правило, не оказывает существенного влияния на итоговый результат: могут измениться отдельные мелкие детали результата, однако концептуальное решение не меняется.

При решении оптимизационной задачи в плоской постановке для обеспечения статической определимости моделируемого объекта необходимо наложение трех связей так,

чтобы при этом обеспечивалась геометрическая неизменяемость объекта моделирования. Это может быть реализовано разными способами: например, посредством применения двух опор: шарнирно–неподвижной (эквивалентно двум связям) и шарнирно–подвижной (эквивалентно одной связи) либо трех шарнирно–подвижных опор или одной заделки (эквивалентно трем связям). Сочетание выбранных опор и места их приложения определяются на основе анализа неизвестных внешних сил в характерных точках исследуемой детали. При наложении связей целесообразно их располагать так, чтобы из расчетной схемы посредством связей исключались внешние силы, определение величины и/или направления которых наиболее трудозатратно. Эти связи должны ограничивать перемещение точек в направлении действия неизвестных сил, вследствие чего эти силы будут действовать на исследуемый объект в виде реакций в опорах. В некоторых задачах может оказаться целесообразным разложение неизвестной силы на две составляющие, одна из которых известна.

При моделировании объекта необходимо учитывать все значимые случаи его нагружения, имеющих место в разные моменты времени. При этом могут быть учтены: значения сил, направления их действия, места их приложения (для подвижных нагрузок).

Полученные результаты при необходимости могут быть скорректированы так, чтобы линии построения (оптимальная топология) не пересекали запрещенные области (области расположения других объектов). С этой целью в модель могут быть включены области разной формы, ограничивающие получаемый результат.

По завершении моделирования анализируются результаты, опираясь на которые проверяется корректность составленной модели и принимается решение о целесообразности внесения в модель уточнений.

### 3. Создания рациональной топологии элемента грузового захвата

В соответствии с предложенным выше порядком моделирования деталей в плоской

постановке выполним поиск рациональной топологии детали грузового захвата [15], предназначенного для работы со строительными конструкциями (рис. 2).

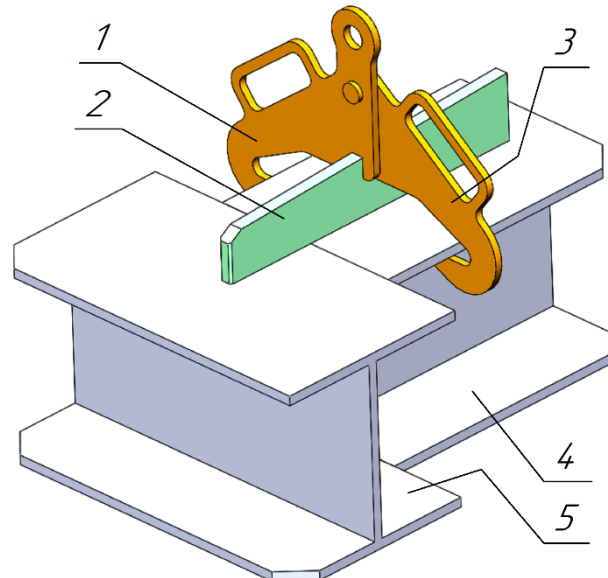


Рис. 2. Грузовой захват

В основе такого захвата – пара соединенных шарнирно рычагов 1 и 3 (рис. 2). При перемещении захватом груза 4 (представлен в виде двутавровой балки) рычаги 1 и 3 прижимаются к нижней грани верхнего пояса груза. Для ограничения относительного поворота рычагов захвата и поджатия элементов захвата к грузу предусмотрен клин 2, который перед началом подъема вставляется сквозь предусмотренные в рычагах прорези. Чем больше усилие, которое прикладывается к клину при его установке в указанные прорези, тем сильнее рычаги захвата прижимаются к поднимаемому грузу и тем надежнее соединение груза с захватом. Потенциально клин может устанавливаться как вручную, так и с применением специальных ударных средств. Клин имеет относительно большую длину и помимо фиксации рычагов 1 и 3 обеспечивает возможность расположения балки 4 в определенном положении относительно другой балки 5. В верхней части рычага 1 предусмотрена проушина для подвеса захвата на грузоподъемном устройстве. На рычагах предусмотрены ручки для ручного раскрытия рычагов захвата и высвобождения груза.



В качестве объекта моделирования выбран рычаг 1 захвата (рис. 2). Нанесем на схему рычага характерные точки  $A-E$  (рис. 3), в которых имеет место контактное взаимодействие данного рычага с иными объектами. Точкой  $A$  отметим область контакта проушины и пальца грузоподъемной оснастки. В месте шарнирного соединения рычагов 1 и 3 захвата положение контактной области на рычаге 1 неочевидно, а потому приближенно примем, что характерная точка  $B$  располагается в центре отверстия. При установке в пазы рычагов захвата клин с некоторым усилием прижимается к рычагу 1 в области точки  $C$ . При подъеме груза рычаг 1 со значительным усилием прижмется к клину в точке  $D$ . Последняя характерная точка – область  $E$ , через которую сила от веса груза передается на рычаг.

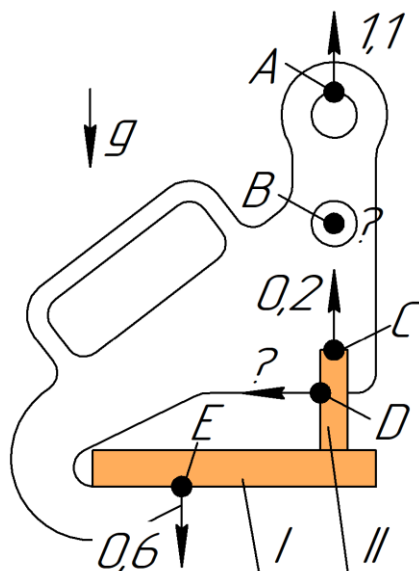


Рис. 3. Расчетная схема рычага захвата

Рассмотрим случай подъема груза, при котором захват нагружен симметрично, центр тяжести груза лежит в плоскости условной симметрии захвата, а гибкий орган грузоподъемного устройства вертикально ориентирован. Для данного случая примем ряд следующих допущений: центр тяжести груза располагается под осью верхнего отверстия захвата (точка  $A$  на рис. 3); клин 2 опирается в рычаг 1 (рис. 2), а создаваемая клином вертикальная сила распирающая рычага и груза составляет 20% от номинального веса поднимаемого груза (случай использо-

вания захвата только для подъема груза без возможности опирания его на другие конструкции с установкой клина в рабочей позиции без приложения значительного усилия). При этом примем ряд следующих общих допущений: усилие от груза к рычагу передается через контактную область (точка  $E$  на рис. 3), которая располагается вблизи конца выступа рычага; силы трения между контактирующими поверхностями клина и рычага пренебрежимо малы; вес захвата равен 10% от номинальной грузоподъемности.

В модели необходимо предусмотреть области отсутствия материала (рис. 3):  $I$  – область, определяемая расположением поднимаемого груза, а также дополнительным пространством, требуемым для обеспечения беспрепятственного обхвата груза захватом;  $II$  – область размещения клина.

Определим параметры внешних сил, приложенных к исследуемой детали в характерных точках: их направления и величины. В точке  $A$  приложена сила от грузового подвеса, которая направлена вверх (рис. 3) и, если принять, что масса груза равна 1, то значение силы в точке  $A$  с учетом принятого ранее допущения (вес захвата равен 10% от его номинальной грузоподъемности) составит 1,1. В точке  $B$  направление действия силы и ее величина неочевидны, а потому целесообразно воздержаться от уточнения параметров силы в этой точке. В точке  $C$  приложенная к рычагу сила взаимодействия с клином направлена вверх, а ее величина согласно принятому допущению составляет 0,2. В точке  $D$  известно направление действия силы (с учетом допущения об отсутствии силы трения между клином и рычагом) – горизонтальное направление, однако для определения ее значения требуются дополнительные вычисления, от которых воздержимся, ограничившись указанием (на рис. 3) направления действия силы. В последней точке  $E$  примем, что сила направлена вертикально, а ее величина определяется исходя из веса груза и внутренней силы, создаваемой клином. Просуммировав обе эти силы и равномерно распределив их по обоим рычагам получим искомую силу в точке  $E$  равную 0,6.

Далее уточним представленную на рис. 3 схему, наложив три связи так, чтобы максимально исключить из нее неизвестные силовые факторы, к которым, как было показано выше, относятся силы в точках  $B$  и  $D$  (рис. 3). Поскольку направление действия силы в точке  $B$  неизвестно, то здесь установим две связи, ограничивающие перемещение по вертикали и горизонтали и образующие шарнирно–неподвижную опору. В точке  $D$  разместим одну связь, ограничивающую перемещение в направлении действия силы (горизонталь), что может быть обеспечено шарнирно–подвижной опорой с подвижностью в вертикальном направлении.

В результате моделирования рычага с учетом наложения связей и добавления области отсутствия материала получена топология, представленная на рис. 4. Результат получен для частного случая заполнения топологией проектной области на 15%. В полученной топологии (рис. 4) имеет место суженная область (указана стрелкой), в которой на практике может возникать изгибающий момент (данное замечание относится также и к топологии, расположенной на участке  $AB$  на рис. 3) по причине того, что присоединяемый к верхней проушине подвес не всегда будет ориентирован строго вертикально. Такое может быть, когда точка подъема грузоподъемного средства располагается в стороне от грузового захвата и до момента отрыва груза от основания натянутый канат будет наклонен на некоторый угол от вертикали. В связи с этим целесообразно уточнение представленной ранее расчетной схемы.

Уточненная расчетная схема рычага (рис. 5) от начальной схемы (рис. 3) отличается тем, что в ней заменены силы в точках  $A$  и  $E$ : вместо одной силы в каждой точке приложено по две силы, которые образуются в разные моменты времени (одинаковым цветом выделены силы, действующие одновременно) в случаях предельного наклона грузозахвата в разные стороны. Принято допущение: предельный угол отклонения подвеса от вертикальной оси захвата составляет  $\pm 10$  градусов. Значение силы, приложенной в точке  $A$ , при повороте захвата остается неизменным и равно сумме веса груза и захвата.

Приблизительно рассчитаны значения сил, образующихся в точке  $E$  в разные моменты времени.

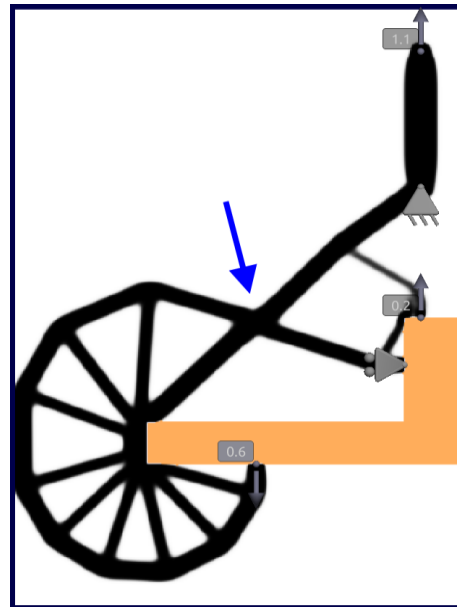


Рис. 4. Результат топологической оптимизации для «идеального» случая подъема груза

Результат моделирования рычага захвата на основе уточненной модели представлен на рис. 6. В этом решении отсутствует область, которую можно было бы характеризовать как «шарнир». На этом можно остановиться и взять такое решение топологии за основу при проектировании нового решения рычага грузового захвата.

Представленный на рис. 6 результат получен для случая применения захвата в условиях без опирания перемещаемой балки на другие строительные конструкции. При опирании захвата на другие строительные конструкции возрастет нагрузка на клин. В новой расчетной схеме (рис. 7) силу вертикального прижатия клина к рычагу 1 захвата примем равной весу поднимаемого груза – 1,0. Соответствующая данному случаю топология (рис. 8) не содержит принципиальных отличий от полученных ранее результатов (рис. 6). Основное отличие – появление топологии, соединяющей точки  $B$  и  $C$ .

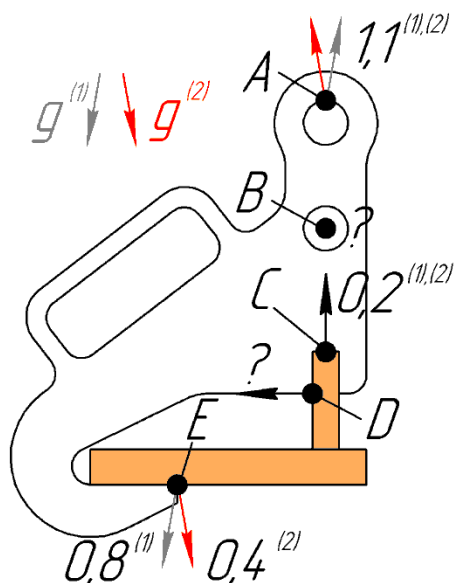


Рис. 5. Уточненная расчетная схема рычага

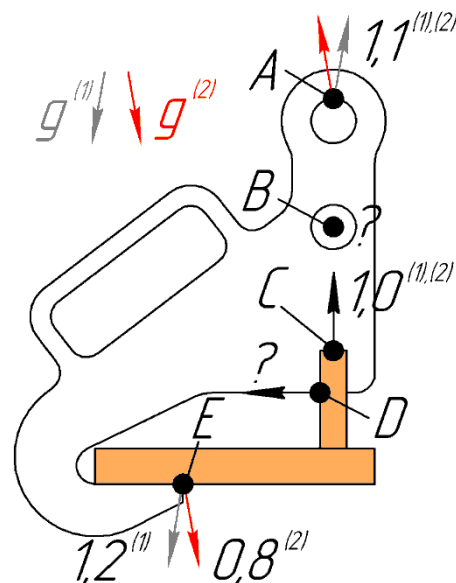


Рис. 7. Уточненная расчетная схема рычага для случая силовой установки клина

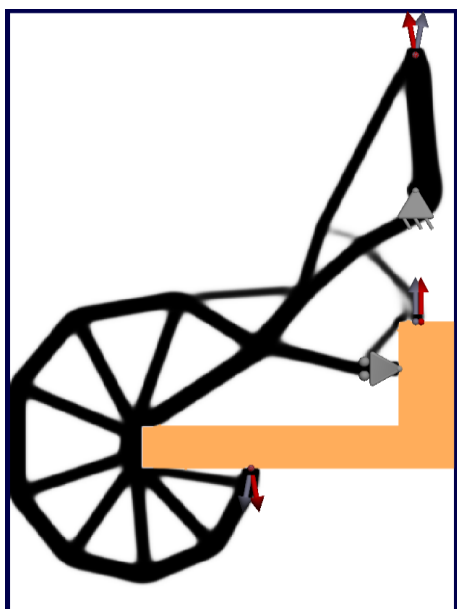


Рис. 6. Результат моделирования на основе уточненной модели рычага

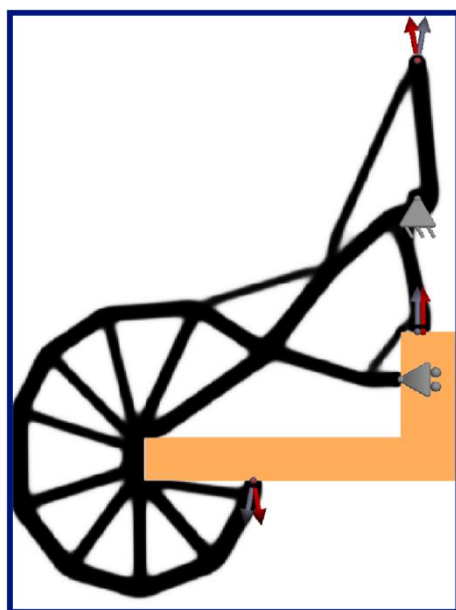


Рис. 8. Результат топологической оптимизации рычага для случая силовой установки клина

#### 4. Проектирование детали на основе результатов оптимизации

Полученная топология (рис. 6 и 8) не дает готового решения геометрии для моделируемого изделия, однако эта информация может быть использована при его проектировании. Такое изделие должно удовлетворять не только условиям прочности и жесткости, но и многим другим условиям, в числе которых: технологичность, эстетичность, собираемость с другими элементами устройства, удобство эксплуатации и др.

На рис. 9 представлено возможное решение рычага, полученное на основе результатов топологической оптимизации (рис. 8). В этом решении предусмотрена пара проушин для подвешивания захвата и соединения его рычагов. Данная геометрия отличается от полученных ранее результатов (рис. 8): левая часть захвата имеет более компактное исполнение, отдельные элементы приобрели прямолинейное исполнение и др.

На рис. 9 новое решение рычага захвата представлено на фоне исходного решения, что наглядно показывает характер перераспределения материала в результате оптимизации. Масса нового исполнения рычага меньше исходного на 42% (при определенной доработке данного рычага это значение может уменьшиться).

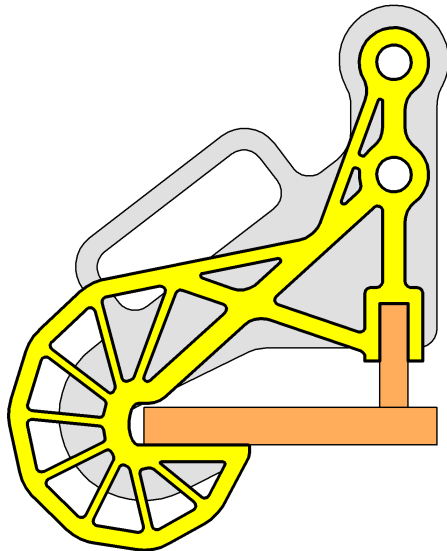


Рис. 9. Решение рычага захвата, полученное на основе результатов топологической оптимизации, с учетом области отсутствия материала на фоне исходного решения рычага

## 5. Сравнение исходного и нового решений элемента захвата

Сравним исходное (рис. 3) и новое (рис. 9) решения рычага захвата на основе их конечно-элементного анализа. Такой анализ выполнен в соответствии с представлена на рис. 7 расчетной схемой для 1-го расчетного случая. В модели толщина рычагов составляет 10 мм. Одна условная единица силы, применявшаяся при топологической оптимизации, соответствует 1000 Н. Полученные в результате конечно-элементного анализа карты напряжений и перемещений представлены на рис. 10 и 11 (деформация геометрии увеличена в 100 раз).

Из результатов (рис. 10, 11) следует, что в новом решении рычага напряжения распределены более равномерно, а пиковая величина (84,0 МПа) меньше, чем в исходном решении рычага (99,8 МПа). В то же время,

новое решение рычага имеет более высокую жесткость, о чем свидетельствуют меньшие перемещения точек рычага (0,067 мм вместо 0,100 мм).

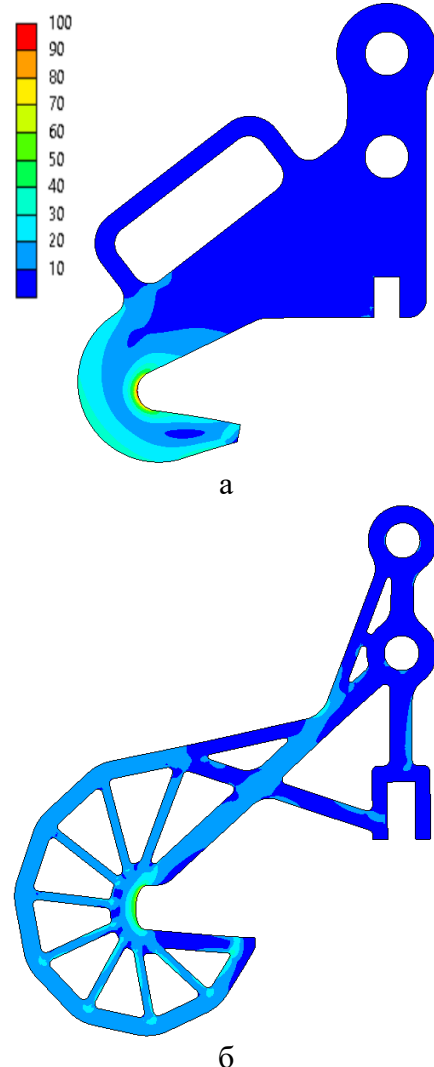


Рис. 10. Карты напряжений в решениях рычага: а – исходное решение; б – новое решение

## 6. Заключение

Представлен алгоритм проведения топологической оптимизации отдельной детали в плоской постановке. Аналогичным образом он может быть применен и для решения задач в объемной постановке.

На основе представленного алгоритма получено новое более легкое решение рычага грузового захвата, обладающее по сравнению с исходным решением более высокими прочностью и жесткостью.

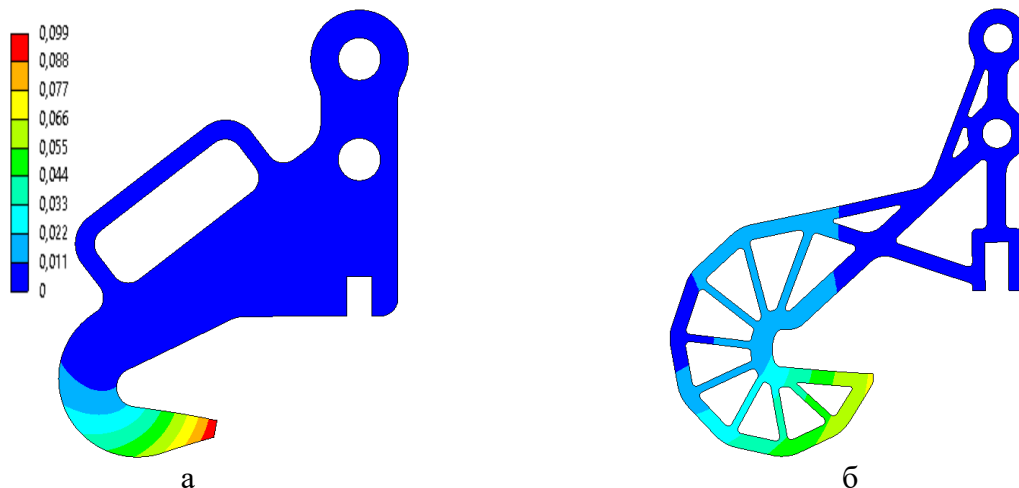


Рис. 11. Карты перемещений в решениях рычага: а – исходное решение; б – новое решение

### Список литературы

1. Гнездилов С.Г., Шубин А.Н. Топологическая оптимизация на примере стрелы башенного крана // Механизация строительства. 2017. №6. С. 40–43.
2. Гнездилов С.Г., Шубин А.Н. Принципы рационального проектирования элементов машин с использованием методов топологической оптимизации // Строительные и дорожные машины. 2016. №2. С. 44–49.
3. Tyflopoulos E., Haskins C., Steinert M. Topology-Optimization-Based Learning: A Powerful Teaching and Learning Framework under the Prism of the CDIO Approach // Education Sciences. 2021. Vol. 11. DOI: 10.3390/educsci11070348
4. Гнездилов С.Г. Моделирование оптимальной топологии деталей устройств. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 52 с.
5. Heidler N., Lukowicz H., Hilpert E., Risse S., Alber L., Klement J., Heine F., Bölter R., Armengol J.M.P. Topology optimization and additive manufacturing of an optical housing for space applications // EPJ Web of Conferences. 2019. Vol. 215.
6. Faskhutdinov R.N., Dubrovskaya A.S., Dongauzer K.A. Maksimov P.V., Trufanov N.A. Topology optimization of a gas-turbine engine part // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 177. P. 012077. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012077
7. Ghungarde V., Awachar S., Vaidya N.K., Jagadeesha T. Design optimization of steering knuckle by adopting bionic design

### References

1. Gnezdilov S.G., Shubin A.N. *Topologicheskaya optimizatsiya na primere strely bashennogo kрана* [Topological optimization on the example of a tower crane boom]. *Mekhanizatsiya stroitelstva*, 2017, No.6, pp. 40–43. (In Russian)
2. Gnezdilov S.G., Shubin A.N. *Printsipy ratsionalnogo proyektirovaniya elementov mashin s ispolzovaniyem metodov topologicheskoy optimizatsii* [Principles of rational design of machine elements using topological optimization methods]. *Stroitelnyye i dorozhnye mashiny*, 2016, No.2, pp. 44–49. (In Russian)
3. Tyflopoulos E., Haskins C., Steinert M. Topology-Optimization-Based Learning: A Powerful Teaching and Learning Framework under the Prism of the CDIO Approach. *Education Sciences*, 2021, Vol. 11. DOI: 10.3390/educsci11070348
4. Gnezdilov S.G. *Modelirovaniye optimal'noy topologii detaley ustroystv* [Modeling of the optimal topology of device parts]. Moscow: MSTU im. N.E. Bauman, 2017. 52 p. (In Russian)
5. Heidler N., Lukowicz H., Hilpert E., Risse S., Alber L., Klement J., Heine F., Bölter R., Armengol J.M.P. Topology optimization and additive manufacturing of an optical housing for space applications. *EPJ Web of Conferences*, 2019, Vol. 215.
6. Faskhutdinov R.N., Dubrovskaya A.S., Dongauzer K.A. Maksimov P.V., Trufanov

approach // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 624. P. 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/624/1/012023

8. Lu X., Yang Y., Zeng W., Xu D. Lightweight Design of Six-dof Tandem Manipulator Based on Additive Manufacturing Technology // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 612. No.3. P. 032145. DOI: 10.1088/1757-899X/612/3/032145

9. Shuping Z., Zengjie Y., Lei X. Research on the Topology Optimization of the rocker arm of compression garbage truck based on Rigid-Flexible coupling // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 423. P. 012107. DOI: 10.1088/1757-899X/423/1/012107

10. Zhang E., Zhang X. Finite element analysis and Topology optimization design for automobile door-handle // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 392. P. 062072. DOI: 10.1088/1757-899X/392/6/062072

11. Ma C., Pu R., Wu L., Zhang L., Lu G. Lightweight Design of a Support Based on Topology Optimization and 3D Printing // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 332. P. 042044. DOI: 10.1088/1755-1315/332/4/0420

12. Gebisa A.W., Lemu H.G. A case study on topology optimized design for additive manufacturing // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 276. P. 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/276/1/012026

13. Zhu J., Yang K., Zhang W. Backbone cup – a structure design competition based on topology optimization and 3D printing // International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization. 2016. Vol. 7.

14. Teo J.W.C., Khan S.F. Topology optimization of mandible fracture plate // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 670. P. 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/670/1/012049

15. Vdovin D., Levenkov Y., Chichekin V. Light frame design for quad bike using topology optimization // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 589. P. 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/589/1/012026

16. Yin J., Zhang S., Liu Y., Sha Z., Ma F.,

N.A. Topology optimization of a gas-turbine engine part. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 177, pp. 012077. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012077

7. Ghungarde V., Awachar S., Vaidya N.K., Jagadeesha T. Design optimization of steering knuckle by adopting bionic design approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 624, pp. 012023. DOI: 10.1088/1757-899X/624/1/012023

8. Lu X., Yang Y., Zeng W., Xu D. Lightweight Design of Six-dof Tandem Manipulator Based on Additive Manufacturing Technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 612, No.3, pp. 032145. DOI: 10.1088/1757-899X/612/3/032145

9. Shuping Z., Zengjie Y., Lei X. Research on the Topology Optimization of the rocker arm of compression garbage truck based on Rigid-Flexible coupling. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 423, pp. 012107. DOI: 10.1088/1757-899X/423/1/012107

10. Zhang E., Zhang X. Finite element analysis and Topology optimization design for automobile door-handle. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2018, Vol. 392, pp. 062072. DOI: 10.1088/1757-899X/392/6/062072

11. Ma C., Pu R., Wu L., Zhang L., Lu G. Lightweight Design of a Support Based on Topology Optimization and 3D Printing. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, Vol. 332, pp. 042044. DOI: 10.1088/1755-1315/332/4/0420

12. Gebisa A.W., Lemu H.G. A case study on topology optimized design for additive manufacturing. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, Vol. 276, pp. 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/276/1/012026

13. Zhu J., Yang K., Zhang W. Backbone cup – a structure design competition based on topology optimization and 3D printing. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 2016, Vol. 7.

14. Teo J.W.C., Khan S.F. Topology optimization of mandible fracture plate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 670, pp. 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/670/1/012049

Yang D., Yuan D. Structural Topology Optimization of Cantilever Crane Boom Based on Equivalent Moving Load Method // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 692. P. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012020

17. Zhao L., Li K., Chang Y., Li J. Topology Optimization Design of Compliant Mechanism of Composite Wing Leading Edge // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1215. P. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1215/1/012002

18. Patent US 2016264381. Clamping apparatus. Swope T.S., Dean R. Declared 14.03.2016. Published 15.09.2016.

‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
15. Vdovin D., Levenkov Y., Chichekin V. Light frame design for quad bike using topology optimization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 589, pp. 012026. DOI: 10.1088/1757-899X/589/1/012026

‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
16. Yin J., Zhang S., Liu Y., Sha Z., Ma F., Yang D., Yuan D. Structural Topology Optimization of Cantilever Crane Boom Based on Equivalent Moving Load Method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, Vol. 692, pp. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/692/1/012020

‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
17. Zhao L., Li K., Chang Y., Li J. Topology Optimization Design of Compliant Mechanism of Composite Wing Leading Edge. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, Vol. 1215, pp. 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1215/1/012002

‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
‡  
18. Patent US 2016264381. Clamping apparatus. Swope T.S., Dean R. Declared 14.03.2016. Published 15.09.2016.

УДК (УДК) 629.7.454.2

МЕТОДОЛОГИЯ ВЫЯВЛЕНИЯ И ОЦЕНКА ЗНАЧИМОСТИ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ  
НА АВАРИЙНОСТЬ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КРАНОВMETHODOLOGY FOR IDENTIFYING AND ASSESSING THE SIGNIFICANCE OF  
FACTORS AFFECTING THE ACCIDENT RATE OF CRANESГорелова М.В., Сладкова Л.А.  
Gorelova M.V., Sladkova L.A.Российский университет транспорта (Москва, Россия)  
Russian University of Transport (Moscow, Russian Federation)

**Аннотация.** Анализ источников научно-технической литературы свидетельствует, что основными факторами, являющимися причиной аварийности грузоподъемных сооружений, являются факторы техногенного, природного и «человеческого» характеров. В статье предложена методология выявления и оценки значимости факторов, являющихся, на первый взгляд, косвенными, но оказывающими существенное влияние на причины аварийности стреловых самоходных кранов. Предлагаемая методология состоит из трех этапов, каждый из которых в отдельности является достаточно хорошо апробированным другими авторами. На первом этапе на основе анализа экспертной оценки по методу Хэя предлагается проводить выявление значимых факторов. На втором этапе на основе критерия хи-квадрат проводится оценивание значимость фактора. На третьем этапе предложена методика проведения численного эксперимента для оценки значимости факторов на основе использования нейронных сетей. Очевидно, что предлагаемую методологию возможно использовать и при оценке значимости факторов других событий, а не только при аварийности грузоподъемных сооружений.

**Ключевые слова:** методология, анализ, оценка, значимость, факторы, аварийность, критерии.

**Дата принятия к публикации:** 06.03.2023  
**Дата публикации:** 25.03.2023

**Сведения об авторах:**

**Горелова Мария Витальевна** – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», e-mail: marusalen@mail.ru

**Сладкова Любовь Александровна** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», e-mail: rich.cat2012@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-5409-6250

**Abstract.** Analysis of the sources of scientific and technical literature shows that the main factors that cause the accident rate of lifting structures are factors of man-made, natural and "human" characters. The article proposes a methodology for identifying and assessing the significance of factors that are, at first glance, indirect, but have a significant impact on the causes of the accident rate of boom self-propelled cranes. The proposed methodology consists of three stages, each of which separately is quite well tested by other authors. At the first stage, based on the analysis of expert assessment according to the Hay method, it is proposed to identify significant factors. At the second stage, on the basis of the chi-squared criterion, the significance of the factor is assessed. At the third stage, a methodology for conducting a numerical experiment is proposed to assess the significance of factors based on the use of neural networks. Obviously, the proposed methodology can also be used in assessing the significance of factors of other events, and not only in case of accident rate of lifting structures.

**Keywords:** methodology, analysis, assessment, significance, factors, accident rate, criteria.

**Date of acceptance for publication:** 06.03.2023  
**Date of publication:** 25.03.2023

**Authors' information:**

**Maria V. Gorelova** – graduate student of the Department Ground transportation and technological means at Russian University of Transport, e-mail: marusalen@mail.ru

**Liubov A. Sladkova** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department Ground transportation and technological means at Russian University of Transport, e-mail: rich.cat2012@yandex.ru.

ORCID: 0000-0002-5409-6250



## 1. Введение

При производстве погрузочно-разгрузочных и строительных работ общего и специального назначения (промышленные здания и сооружения, мосты, дороги, развязки, установка мачт линий электропередач и т.п.), при прокладке трубопроводов грузоподъемные краны являются одной из ведущих единиц техники основного технологического назначения. Ежегодно компании, осуществляющие свою деятельность во всех сферах строительства сдают отчетность в контролирующие органы (Росстат, Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Ростехнадзор), которая отражает сведения:

- о количестве единиц грузоподъемной техники, содержащейся на балансе предприятия;

- о числе аварий, происходящих с тем или иным видом грузоподъемной техники с указанием места, даты и времени происшествия;

- о количестве происшествий, повлекших за собой травматизм рабочего персонала.

К основным факторам, влияющим на аварийность грузоподъемных сооружений, в том числе и стреловых самоходных кранов [1 - 4], в соответствии с материалами научно-технической литературы относят факторы техногенного, природного, человеческого, и эксплуатационного (своевременное обслуживание, аренда подрядными организациями) характера. Указанные факторы носят обобщенный характер, но «внутри» каждого из них имеется достаточно большое число (около 50 [5]), на первый взгляд, не взаимосвязанных факторов.

Например, к числу факторов природного характера можно отнести атмосферное давление, осадки, облачность и т.п. явления, которые по результатам исследований со стороны медицинских работников оказывают существенное влияние на состояние человека (самочувствие, внимательность, качество выполняемых работ и т.д.). Такие факторы, как время суток, день недели с большой натяжкой можно отнести к факторам эксплуатационным, но которые тоже, по словам медиков влияют на состояние человека. Следует отме-

тить, что такие исследования ранее в научно-технической литературе не отмечались.

Для выявления значимости указанных выше факторов разработана методика сбора и обработки статистических данных.

## 2. Методика сбора исходных данных

Сбор статистических данных по аварийности стреловых самоходных кранов имеет достаточно большую глубину поиска и проведен за период с 2006 по 2021г.г. Для фиксирования интересующих факторов была разработана таблица (табл.1) с указанием предполагаемой причины аварии (данные Росстата), места, даты происшествия, дня недели, времени суток, а также внешних климатических условий, соответствующих эти датам и времени. В качестве внешних условий были рассмотрены:

- температура воздуха в момент аварии, градус Цельсия;

- скорость ветра, м/с;

- относительная влажность воздуха, %;

- атмосферное давление, мм рт. ст.;

- наличие облачности и осадков;

- тип грунта в месте проведения работ.

Источником данных по погодным факторам являются сводки Gismeteo [6] за соответствующий день. Тип грунта местности с места аварии определен по почвенным картам.

## 3. Выявление значимых факторов

Значимость рассматриваемых факторов оценивалась на первом этапе предлагаемой методологии. Для этой цели использовался хорошо себя зарекомендовавший и неоднократно апробированный другими исследователями метод экспертной оценки (метод Хэя) [0]. Напомним, что выявление значимых факторов определяется на основе оценки специалистов, к числу которых относятся руководящие работники (руководитель подразделения, главный инженер, прораб) квалифицированные специалисты (линейные инженеры, квалифицированные рабочие, крановщики). Результаты экспертного опроса в области устойчивости стреловых крановых конструкций позволяют определить вес

Таблица 1

## Обзор аварий (опрокидывания) стреловых самоходных кранов за 2006-2021 год

Дата	День недели	Время суток	Место аварии	Характеристики климата						Предполагаемая причина аварии
				Температура воздуха, °С	Скорость ветра, м/с	Относительная влажность, %	Облачность	Атмосферное давление, мм.рт.ст.	Осадки	
04.03.2006	сб		п. Мошково	-6	3	50	обл	869	нет	Перегруз
04.05.2006	чт		Пермский край, р. Тулва	+9	6	60	нет	960	нет	Перегруз
03.04.2007	вт	13:50	Санкт Петербург, Ви- тебский проспект	+2	3	90	обл	1004	нет	Перегруз
29.11.2007	чт	15:00	Нижний Новгород	-3	4	80	нет	978	да	Проседание опоры
20.12.2010	пн	11:00	Москва, Электролит- ный пр-д	-7	2	77	нет	992	нет	Проседание опоры
26.01.2011	ср	9:00	Барнаул, ул. Мерзликина	-21	2	24	нет	769	нет	Перегруз
18.04.2011	пн	17:30	Москва, Болотников- ская ул.	+7	7	78	нет		нет	Порыв ветра
26.04.2011	вт	14:00	Воронеж, ул. Сакко и Ванцетти	+20	3	64	обл	753	нет	Перегруз
30.09.2011	пт	9:30	Москва, Колтевский б-р	+11	1	66	нет	998	нет	Перегруз
14.11.2013	чт	12:30	Москва, Мичурин- ский пр-т	+3	2	97	обл	746	нет	Ошибка кра- новщика
08.11.2014	сб	8:00	Москва, Нахимовский проспект	+7	5	100	обл	1000	нет	Перегруз
06.02.2016	сб	14:30	Москва, Кутузовский пр-т	-1	2	80	обл	479	нет	Проседание опоры
20.09.2016	вт	19:30	Москва, Севастополь- ский проспект	+9	2	93	обл	995	нет	Перегруз
11.07.2017	вт	17:00	Красноярск, аэропорт Емельяново	+22	2	10	нет	727	нет	Проседание опор
17.05.2018	чт	14:00	Усть-Кут, причал Осетровского завода	+16	2	3	нет	727	нет	Перегруз
03.10.2018	ср	18:00	Москва, 19 км. МКАД	+10	1	94	обл	735	нет	Ошибка кра- новщика
24.10.2018	ср	15:00	Н.Новгород, ул. Ана- толия Григорьева	+7	3	81	обл	986	нет	Ошибка кра- новщика
23.01.2019	ср	15:30	Дальний Восток, пос. Холмск- Сортировочный	-3	4	7	нет	751	нет	Перегруз
25.07.2020	сб	17:00	Москва, 47-й км. МКАД	+22	5	55	обл	750	нет	Перегруз
13.03.2021	сб	17:03	Павлодар, ул. Естая	+15	5	20	нет	752	нет	Перегруз
23.03.2021	вт	12:30	Станица Стародере- вянковая, ул. Крас- ная	+4	3	70	обл	752	нет	Перегруз
02.09.2021	чт	13:30	г.Сочи, ул. Абрамова	+25	2	53	обл	752	да	Проседание опоры

и значимость каждого из рассматриваемых факторов. В нашем случае при анализе статистических данных (табл. 1) в качестве экспертов были приглашены (7 человек) руководители и специалисты, взаимодействующие непосредственно с техникой (операторы кранов, специалисты по техническому обслуживанию машин и механизмов). Обработка показателей важности проводилась с использованием аппарата теории вероятностей и математической статистики.

Перед проведением опроса был проведен грейдинг факторов, ведущих к аварии крана путем проставления оценки каждого из них по определенным критериям, которые были предложены нами (грейдинг – группировка факторов по определенным основаниям и оценивание их с целью выявления важности влияния фактора на опрокидывание крановых конструкций [0]). В качестве критериев оценки факторов (грейдинговые показатели), приведенных в табл. 1 и 2, ведущих к опрокидыванию крана, были выбраны:

1. Сложность считывания данных фактора датчиками.
2. Переменчивость фактора опрокидывания (внезапность изменения его значения).
3. Сложность прогнозирования возникновения фактора опрокидывания.
4. Оценка влияния фактора на физический процесс опрокидывания крановой конструкции.
5. Скорость (внезапность) возникновения фактора опрокидывания.
6. Сложность реагирования на возникновения фактора опрокидывания.
7. Зависимость предотвращения аварии от опыта крановщика.

Далее каждому фактору по пятибалльной шкале в соответствии с нормативной документацией и исследованиями в области устойчивости крановых конструкций присваивается коэффициент значимости  $k$ .

Значения коэффициента значимости по факторам, приводящим к аварийности крановых конструкций, приведены в табл. 2. Самый низкий коэффициент значимости имеет облачность.

Определение значения влияния каждого из факторов опрокидывания производится

Таблица 2

Коэффициенты значимости факторов аварий стреловых самоходных кранов

Наименование фактора	Коэффициент значимости $k$
Температура воздуха	4
Скорость ветра	5
Влажность воздуха	4
Атмосферное давление	4
Облачность	3
Осадки	4
Тип грунта	5
Время суток	4
День недели	4
Человеческий фактор	5

путем грейдинга факторов на основании оценки экспертов.

Для наглядности проведенных исследований полученные данные были сведены в табл. 3, где в столбце «Критерии оценивания» под номерами 1-7 указаны эксперты, дававшие оценку влияния факторов, а в последних трех строках представлен расчет веса каждого из факторов.

В строке «Сумма» приведена сумма результатов экспертной оценки по каждой группе грейдинга и по каждому фактору.

В строке «Значимость» представлена значимость каждого фактора по грейдинговой раскладке как произведение найденных сумм на соответствующий фактору коэффициент значимости  $k$ , указанный в табл. 3, по формуле:

$$Z = Ck, \quad (1)$$

где  $Z$  – значимость фактора;  $C$  – сумма критериев по показателям фактора;  $k$  – коэффициент значимости фактора.

Например, для оценки значимости скорости ветра  $Z = 14 \cdot 4 = 56$ .

Здесь цифра 4 взята из табл. 2 в соответствии с коэффициентом значимости, принадлежащим соответствующему фактору «скорость ветра».

После чего была найдена общая сумма полученных значений строки «Значимость», равная 703.

Вес фактора, выраженный в %, был определен, как частота появления события.

Таблица 3

## Результаты анализа факторов по методу Хэя

Критерии оценивания	Температура	Скорость ветра	Влажность	Давление	Облачность	Осадки	Тип грунта	Время суток	День недели	Человеческий фактор	Суммы по столбцам
1	1	3	2	1	3	2	4	1	1	5	23
2	2	5	3	5	4	4	1	1	1	5	31
3	3	5	3	3	3	3	5	1	1	5	33
4	1	5	1	1	1	2	5	1	1	5	23
5	1	5	1	1	3	4	5	1	1	5	27
6	3	4	2	3	2	3	4	1	1	5	28
7	3	5	3	4	2	3	5	3	3	1	32
Сумма	14	32	15	18	18	21	29	9	9	31	197
Значимость	56	160	60	72	54	84	145	36	36	703	
Вес, %	7	19	7	8	6	10	17	4	4	18	

Анализ табл. 3 показывает, что к числу факторов, лежащих за пределами 10 %, на которые необходимо обратить внимание при эксплуатации стреловых самоходных кранов следует отнести:

- человеческий фактор;
- скорость ветра;
- несущую способность грунта, на котором работает кран (тип грунта);
- атмосферные осадки.

Следует отметить, что падение кранов происходило в основном при положительной температуре и наличии осадков, которые являются одной из основных причин снижения несущей способности грунта.

Проведенный анализ по столбцам табл. 3 позволяет оценить взаимное влияние выбранных факторов на правильность выбора критериев оценивания, так как разброс между этими значениями незначителен.

#### 4. Оценка достоверности факторов значимости по критерию хи-квадрат

Оценку достоверности полученных выше результатов проведем по критерию нулевой ( $h_0$ ) и альтернативной гипотез ( $h_1$ ) по следующему алгоритму [0]:

1. Определение уровня значимости критерия.

2. Отбор необходимых данных из выборки.

3. Вычисление значения статистики критерия, отвечающей критерию  $h_0$ .

4. Вычисление критической области, проверка статистики критерия на предмет попадания в критическую область.

5. Интерпретация достигнутого уровня значимости  $p$  и результатов.

Очевидно, что на самочувствие машиниста и рабочего персонала стреловых самоходных кранов значение оказывает атмосферное давление. Поэтому для подтверждения важности гипотезы о влиянии, например, атмосферного давления на самочувствие человека по выборке (табл. 3), состоящей из 22 наблюдений и относящейся к малой выборке, применим критерий согласия Пирсона (критерий хи-квадрат). Для этого величины атмосферного давления были ранжированы и разбиты на интервалы (всего 3), величина которых определялась, исходя из медицинских рекомендаций с точки зрения влияния на человека:

- низкое давление – давление, переходящее порог ниже 745 мм ртутного столба;
- нормальное давление – давление, заключенное в промежутке от 746 до 765 мм ртутного столба;
- повышенное давление – давление выше 766 мм ртутного столба.

С каждым выделенным интервалом было соотнесено количество аварий. Далее оценивалась вероятность аварий в каждом интервале по зависимости (2)

$$p_i = \frac{n_i}{n}, \quad (2)$$

где  $p_i$  – вероятность аварий  $i$ -го интервала;  $n_i$  – количество аварий  $i$ -го интервала;  $n$  – общее количество аварий.

Далее по зависимости (3) был определен критерий согласия Пирсона (хи-квадрат).

$$\chi^2 = \sum_1^i \frac{(p_i - p_i \cdot n_i)^2}{p_i \cdot n_i}. \quad (3)$$

В соответствии со значениями квантилей распределения хи-квадрат [0] была определена достоверность гипотезы при 0,95) и

числе степеней свободы ( $s - 1 = 3 - 1 = 2$ , где  $s$  – количество интервалов).

В ходе проведенных расчетов квантиль распределения хи-квадрат получился равным 7,005, что соизмеримо с погрешностью квантиля распределения, равного 0,377, в допустимых пределах инженерных расчетов (5%).

Подобная методика применялась при определении влияния других параметров (температура воздуха, облачность, день недели, влажность воздуха, время суток) на аварийность стреловых самоходных кранов. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Таблица 4

Статистические показатели факторов аварий стреловых самоходных кранов

Статистические показатели	Атмосферное давление	Температура воздуха	Облачность	День недели	Влажность воздуха	Время суток
Среднее значение	852	7	0,5	3,14	61,909	14,04
Математическое ожидание	819,091	6,779	11,091	4,364	61,091	16,125
Дисперсия	217,553	4,672	2,887	0,060	29,005	0,930
Среднее квадратичное отклонение	14,750	2,161	1,699	0,245	5,386	0,965
Вероятность	0,975	0,2	0,5	0,3	0,975	0,87

Таким образом, в ходе проведенного статистического анализа аварий стреловых самоходных кранов по критерию хи-квадрат было выявлено, что при производстве работ помимо таких факторов, как состояние опорной поверхности, скорость ветра, следует также учитывать атмосферное давление, время суток, влажность воздуха.

Влияние указанных факторов может быть обусловлено, как с биологической точки зрения (например, ухудшение самочувствия крановщика в результате повышенного атмосферного давления, утомляемость в дневное время в связи с накопившейся усталостью во время смены при производстве работ), так и с точки зрения техногенного характера (например, повышенная влажность воздействует на грунт, что в свою очередь может вызвать просадку опор). Кроме этого, повышенная влажность образует конденсат, что может вызывать проскальзывание в механизмах крановых конструкций.

При оценке устойчивости стреловых самоходных кранов важно понимать, какие

факторы имеют наибольшую значимость, а какие нет. Для этого необходимо определить вес фактора. Под весом фактора понимают значимость того или иного фактора на рассматриваемое событие. При настройке системы безопасности предлагается ввести коэффициенты, соответствующие значениям веса того или иного фактора, для коррекции значений показателей датчиков и скорости реагирования на событие, предвещающие аварийные ситуации.

Существует несколько теорий для определения веса факторов. Первый из рассмотренных способов определения важности (веса) факторов можно определить, исходя из математической модели взаимного влияния факторов, рассмотренной в работе [0]. Вес фактора можно определить исходя из величины среднеквадратического отклонения рассматриваемого фактора, отнесенного к сумме среднеквадратичных отклонений всех факторов и выраженного в процентном соотношении. В качестве критерия для определения весов факторов была выбрана вероят-

ность, определенная по критерию Пирсона. Просуммировав вероятности, указанные в строке 5 табл. 4, и рассмотрев процентное соотношение каждой вероятности фактора к общей сумме вероятностей факторов, была получена диаграмма распределения весов, указанная на рис. 1.



Рис. 1. Распределение веса фактора

На рис. 1 видно, что наибольшую значимость на аварийность стреловых самоходных кранов имеют такие факторы, как тип грунта, скорость ветра, атмосферное давление, влажность воздуха (вес 17), а также время суток

(вес 15). Температура воздуха имеет вес 3, день недели – вес 5, облачность – вес 9.

Кроме того, в результате полученных данных можно сделать вывод о совокупном влиянии факторов как на аварийность стреловых самоходных кранов, т.е. выделить ненормируемые факторы. Так, например, напряженный график работы оператора в течение смены в связи с большим объемом работ может привести к накоплению усталости, что в свою очередь отразится на следующем рабочем дне, в случае сменного графика работы. Таким образом, влияние факторов на аварийность крановых конструкций и взаимовлияние факторов может быть представлено схемой, представленной на рис. 2.

## 5. Численные методы оценки значимости факторов аварийности стреловых самоходных кранов

На рис. 2 видно, что факторы, действующие на аварийность стреловых самоходных кранов, находятся в тесной связи друг с другом: так порывистый ветер может привести к возникновению облачности, что в свою очередь может привести к повышению влажности и сказаться на атмосферном давлении. Кроме того, схема имеет схожие черты со структурной схемой нейронной сети одно-

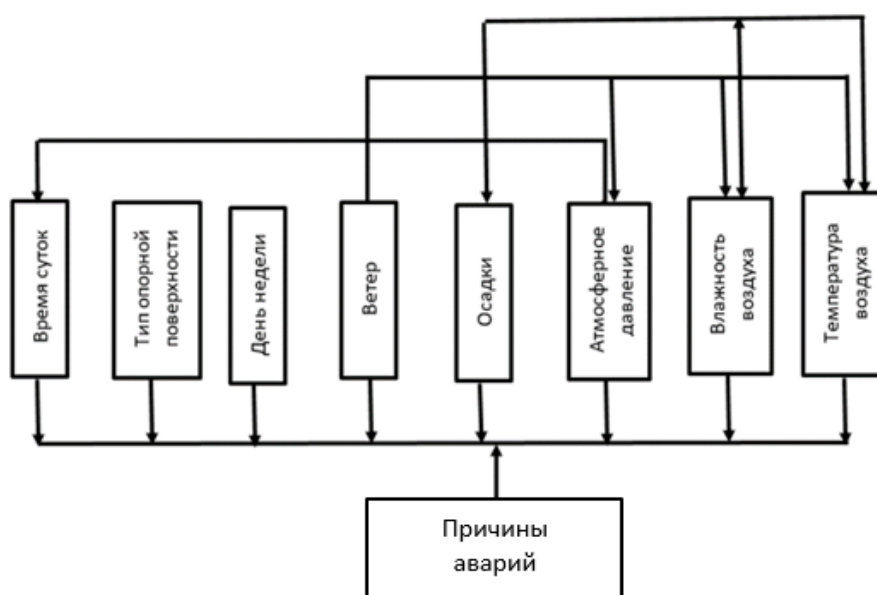


Рис. 2. Схема взаимовлияния факторов и влияние факторов на аварийность стреловых самоходных кранов

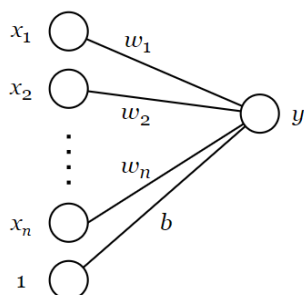


Рис. 3. Схема нейронной сети однослойного восприятия

слояного восприятия (перцептона) [0]. На основании этого принцип нами предлагается модель, представленная на рис. 3.

Здесь  $X_{1-n}$  – входные параметры (факторы);  $\omega_{1-n}$  – вес параметра (фактора);  $y$  – выходная функция (авария стрелового самоходного крана);  $b$  – смещение, необходимое для обучения нейронной сети (рис. 3).

В связи с этим третьим методом для определения важности факторов является метод, используемый при определении весов в нейронных сетях, позволяющий промоделировать достоверность полученных результатов.

Определение веса фактора  $\omega$  происходит посредством метода градиентного спуска, где веса факторов определяются пошагово с учетом скорости обучения  $\alpha$  и градиента функции ошибки  $\nabla L$ , являющимся частной производной от веса фактора [0], определяемая по формуле (4).

$$\omega^{(k+1)} = \omega^k - \alpha \cdot \nabla L(\omega^k). \quad (4)$$

Шаг изменения веса фактора каждой итерации определяется по зависимости (5):

$$\Delta\omega = -2 \cdot \alpha \cdot \Delta y \cdot f'(z) \cdot x, \quad (5)$$

где  $\Delta\omega$  – шаг изменения веса фактора;  $\alpha$  – скорость обучения;  $\Delta y$  – ошибка предсказания;  $f'(y)$  – значение производной активационной функции

$$y = \sum_{i=1}^{n+1} x_i \cdot \omega_i, \quad (6)$$

где  $x$  – значение входного фактора.

Следует отметить, что скорость получения наиболее точных результатов будет зависеть от того, насколько близки значения заданных весов факторов к рассчитанным нейронной сетью. В связи с трудоемкостью расчетов применяют различные программ-

ные комплексы, где есть заложенные пакеты расчетов нейронных систем (например, программный комплекс Matlab).

Также в теории машинного обучения для определения веса фактора используется уравнение линейной регрессии. Одним из способов вычисления параметров модели (зависимости  $y$ ) от влияющих на нее факторов является метод наименьших квадратов, минимизирующий среднеквадратичную ошибку рассматриваемого параметра между полученным и расчетным значениями по формуле (7) [0].

$$L(X, \vec{y}, \vec{\omega}) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i \omega_i)^2. \quad (7)$$

Для решения данной задачи необходимо вычислить производные по параметрам модели, приравнять их к нулю и решить полученные уравнения относительно  $\omega$ .

Согласно теореме Гаусса-Маркова минимизация среднеквадратической ошибки в случае уравнения парной регрессии не приведет к искажению параметров рассматриваемых моделей, а лишь выйдут из условий теоремы и ухудшат достоверность линейных результатов.

Определив вес фактора при настройке системы безопасности, учитывая внешние условия для того или иного типа местности, можно устанавливать оптимальные параметры, обеспечивающие повышенную безопасность при производстве работ.

Рассмотрев полученные результаты статистического анализа и метода Хэя, а также сравнив значения полученных весов можно судить о достоверности полученных результатов.

В результате проведенной обработки статистических данных по предлагаемой нами методике было выявлено, что указанные факторы влияют не только на самочувствие крановщика, но и в значительной мере оказывают влияние на ход выполнения работ, усложняя его при ухудшении условий (осадки, плохая видимость, повышенная влажность и др.). Своевременное предупреждение указанных в результате проведенных исследований факторов ведущих к опрокидыванию стреловых крановых конструкций позволит снизить их численность.

### Заключение

Предлагаемая методология выявления и оценки значимости факторов позволила с доверительной вероятностью 0,95 установить факторы и степень их влияния ненормируемых на аварийность грузоподъемных

кранов. К наиболее значимым факторам, выявленным по предложенной методологии, следует отнести тип грунта, скорость ветра, атмосферное давление, влажность воздуха (вес 17), время суток (вес 15).

### Список литературы

1. Сладкова Л.А., Крылов В.В., Горелова М.В. Анализ научно-технической литературы о влиянии ветровой нагрузки на стреловые конструкции // Строительные и дорожные машины. 2020. № 12. С. 9-13.

2. Вершинский А.В. Технологичность и несущая способность крановых металлоконструкций. М., Машиностроение, 1984. 167 с.

3. Григорьев П.А., Горелова М.В., Крылов В.В., Сладкова Л.А. Анализ работы и способов обеспечения устойчивости стреловых самоходных кранов на слабонесущих грунтах // Наземные транспортно-технологические комплексы и средства. Материалы междунар. научно-техн. конф. 2019. С.55-60.

4. Ежегодные отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс] // РОСТЕХНАДЗОР 2013-2021. – Режим доступа: [http://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/index.php?sphrase\\_id=1656336](http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/index.php?sphrase_id=1656336). – 01.02.2021.

5. Крылов В. В. Методика обеспечения устойчивости стреловых кранов при проектировании и эксплуатации от комплексного влияния факторов техногенного и природного характера: дисс. ... канд. техн. наук, 05.02.02. М. 2021. 276 с.

6. Погода в городах и странах [Электронный ресурс] // Gismeteo – Режим доступа: <https://xn--80aeabfj7apnbee8a.xn--p1ai/>. – 23.01.2021.

7. Хэй-метод [Электронный ресурс] // Kommersant.ru. – Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/859659/>. – 05.03.2021.

8. Грейдирование должностей (метод Хэя) [Электронный ресурс] // Kommersant.ru. – Режим доступа: <https://studme.org/81108/menedzhment/greyd>

### References

† 1. Sladkova L.A., Krilov V.V., Gorelova M.V. Analiz nauchno-tekhnicheskoy literature o vlianii vetrovoy nagruzki na streloveiye konsthukticii. *Stroitelnie i dorozhnie mashinie*, 2020, No.12. P. 9-13. (In Russian).

† 2. Vershinskiy A.V. *Tekhnologichnost i ntsuschay sposobnost kranovikh metallokonstruktziy*. Moscow, Mashinostroenie, 1984. 167 p. (In Russian).

† 3. Grigorev P.A., Gorelova M.V., Krilov V.V., Sladkova L.A. Analiz raboty i sposobov obespecheniya ustojchivosti strelovyh samohodnyh kranov na slabonesushchih gruntah. *Nazemnye transportno-tekhnologicheskie komplekxy i sredstva*. *Materialy mezhdunarodnoj nauchnoj tekhnicheskoy konferentsii*, 2019, pp. 55-60. (In Russian)

† 4. Ezhegodnye otchety o deyatel'nosti Federalnoj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru [Internet-resurs]. ROSTEKHNADZOR 2013-2021. [http://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_reports/index.php?sphrase\\_id=1656336.01.02.2021](http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/index.php?sphrase_id=1656336.01.02.2021) (In Russian)

† 5. Krylov V.V. *Metodika obespecheniya ustojchivosti strelovyh kranov pri proektirovanii i ekspluatacii ot kompleksnogo vliyaniya faktorov tekhnogennogo i prirodnogo haraktera*. (In Russian)

† 6. Pogoda v gorodah i stranah [Internet-resurs]. <https://xn--80aeabfj7apnbee8a.xn--p1ai/>. – 23.01.2021. (In Russian)

† 7. Hey-metod [Internet-resurs]. Kommersant.ru. <https://www.kommersant.ru/doc/859659> 05.03.2021. (In Russian)

† 8. Grejdirovanie dolzhnostej (metod Heya) [Internet-resurs]. Kommersant.ru. [https://studme.org/81108/menedzhment/greyd\\_iro\\_vanie\\_dolzhnostey\\_metod](https://studme.org/81108/menedzhment/greyd_iro_vanie_dolzhnostey_metod). – 05.03.2021. (In Russian)



irovanie\_dolzhnostey\_metod. – 05.03.2021.

9. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

10. Открытый курс машинного обучения. Тема 4. Линейные модели классификации и регрессии [Электронный ресурс] // Хабр – Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/ods/blog/323890> – (04.04.2021).

11. Почему инициализировать веса нейронной сети одинаковыми значениями (например, нулями) – это плохая идея [Электронный ресурс] // Хабр – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/592711>. – 04.04.2021.

‡ 9. Кобзарь А.И. *Prikladnaya matematicheskaya statistika*. Moscow, Fizmatlit, 2006. 816 p. (In Russian)

‡ 10. *Otkrytyy kurs mashinnogo obucheniya. Tema 4. Linejnye modeli klassifikatsii i regressii* [Internet-resurs]. Habr.

‡ <https://habr.com/ru/company/ods/blog/323890>  
‡ 0. 04.04.2021. (In Russian)

‡ 11. *Pochemu inicializirovat vesa nejronnoj seti odinakovymi znacheniyami (naprimer, nulyami) – eto plohayaya ideya* [Internet-resurs]. Habr. <https://habr.com/ru/post/592711>. 04.04.2021. (In Russian)

‡  
‡  
‡

УДК (UDC) 629.012

## МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ РАМ МАЛОМОЩНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ (КВАДРОЦИКЛОВ) НА ОСНОВЕ ТРУБЧАТЫХ ПРОФИЛЕЙ

## METHODOLOGICAL ASPECTS OF CREATING FRAMES FOR LOW-POWER VEHICLES (ATVS) BASED ON TUBULAR PROFILES

Далида Н.В.<sup>1</sup>, Филькин Н.М.<sup>2</sup>, Скуба Д.В.<sup>3</sup>  
Dalida N.V.<sup>1</sup>, Filkin N.M.<sup>2</sup>, Scuba D.V.<sup>3</sup><sup>1</sup> – АО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг» (Ижевск, Россия)<sup>2</sup> – Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (Ижевск, Россия)<sup>3</sup> – ООО «ТехноСтудия «Профиль» (Ижевск, Россия)<sup>1</sup> – Izhevsk Motor Plant «Axion-holding» JSC (Izhevsk, Russian Federation)<sup>2</sup> – Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov (Izhevsk, Russian Federation)<sup>3</sup> – LLC Technostudio «Profile» (Izhevsk, Russian Federation)

**Аннотация.** В работе рассматриваются основные методические аспекты создания несущей системы (рамы) малоомощного транспортного средства (квадроцикла) на базе трубчатых профилей. Рассмотрены основные требования к раме квадроцикла, вопросы компоновки квадроцикла на основе базовых трех точек. Предложены требования к раме квадроцикла, учитывающие возможности унификации элементов конструкции и модернизации конструкции в перспективе при создании других моделей машин. Проведен анализ потребительских свойств к квадроциклу и влияние этих свойств на конструкцию проектируемой машины. Предложен укрупненный алгоритм разработки рамы малоомощного транспортного средства, а также предлагается распространить метод кубических форм на процесс проектирования квадроцикла. Рассмотрены требования точности при различных способах сборки трубчатых деталей несущей системы квадроцикла.

**Ключевые слова:** малоомощное транспортное средство, рама квадроцикла, трубчатый профиль, мотоциклетная посадка, потребительские свойства, метод кубических форм.

**Дата принятия к публикации:** 10.03.2023  
**Дата публикации:** 25.03.2023

**Сведения об авторах:**

**Далида Николай Вацлавович** – начальник цеха, АО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг», e-mail: n.dalida@mail.ru.

**Филькин Николай Михайлович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автомобили и металлообрабатывающее оборудование», ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», e-mail: fnm@istu.ru.

**Скуба Денис Владиславович** – кандидат технических наук, доцент, инженер-конструктор, ООО «ТехноСтудия «Профиль», e-mail: denskuba@mail.ru.

**Abstract.** The paper discusses the main methodological aspects of creating a carrier system (frame) of a low-power vehicle (quad-cycle) based on tubular profiles. The basic requirements for the frame of the ATV, the issues of the layout of the ATV based on the basic three points are considered. The requirements for the ATV frame are proposed, taking into account the possibilities of unification of design elements and modernization of the structure in the future when creating other models of tires. The analysis of consumer properties for the ATV and the influence of these properties on the design of the designed machine is carried out. A simplified algorithm for the development of a low-power vehicle frame is proposed, and it is also proposed to extend the cubic shape method to the ATV design process. The accuracy requirements for various methods of assembly of tubular parts of the ATV carrier system are considered.

**Keywords:** low-power vehicle, atv frame, tubular profile, motorcycle landing, consumer properties, cubic shape method.

**Date of acceptance for publication:** 10.03.2023  
**Date of publication:** 25.03.2023

**Authors' information:**

**Nikolay V. Dalida** – Head of the workshop, Izhevsk Motor Plant «Axion-holding» JSC, e-mail: n.dalida@mail.ru.

**Nikolay M. Filkin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department «Automobiles and Metalworking Equipment» at IzhSTU named after M.T. Kalashnikov, e-mail: fnm@istu.ru.

**Denis V. Skuba** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Design engineer, LLC Technostudio «Profile», e-mail: denskuba@mail.ru.

## 1. Введение

Основное количество существующей научной литературы по теме маломощных транспортных средств на базе рам трубчатых профилей в основном посвящено мотоциклам. Квадроциклы с мотоциклетной посадкой и с автомобильной посадками на каркасных рамах появились как недорогая альтернатива легковому автомобилю и как машина для эксплуатации в тяжелых дорожных условиях. Данные транспортные средства – это условно что-то среднее между мотоциклом и легковым автомобилем. Самым важным условием при создании данных транспортных средств является корректно сконструированная рама. Большинство рам для квадроциклов, трициклов, мотоциклов, багги (квадрициклов) и прочих подобных транспортных средств создаются на базе каркасов из труб круглого сечения. Важным критерием является то, что рама должна быть лёгкой, прочной, жёсткой, а сварные швы должны быть выполнены на основании нормативов (ГОСТы). Большинство конфигураций существующих рам имеют сложную геометрию, что усложняет технологию изготовления, при этом необходимо определять размерность труб, радиусы сгибов, места сварки по условию рациональной лаконичности конструкции и др.

Одной из первых работ в России по проблемам создания транспортных средств особо малого класса является монография [1], в которой проведен обзор такого типа машин, созданных в мире, рассмотрен типаж и возможные компоновочные схемы, представлены эскизные компоновки предлагаемого квадроцикла автомобильного типа и др.

Дальнейшее развитие поставленных проблем в работе [1] позволило обосновать перспективность создания квадроцикла мотоциклетной посадки на основе трубчатых профилей несущей системы [2]. Для реализации процесса проектирования такого типа квадроцикла разработан новый подход к формообразованию транспортных средств, базирующийся на методе использования кубических объёмов [3], который реализован на компьютерных системах и технологиях 3D-моделирования [4]. Результатом работ

авторов статьи стало создание конструкции квадроцикла унитарного типа [5].

Основными мировыми производителями квадроциклов являются компании: BRP, Polaris, Yamaha, Kawasaki, Suzuki, Stels, CFMOTO, Electric-machine. Иностранная литература по вопросам проектирования квадроциклов практически отсутствует. При этом имеется большое количество работ, описывающих эксплуатационные характеристики квадроциклов, их конструкции, условия и руководства по эксплуатации, проблемы безопасности и т.п.

Целью настоящей работы является краткое обобщение разработанных методических аспектов создания рам квадроциклов на основе трубчатых профилей, что в дальнейшем позволит создать теоретические основы создания рамно-каркасных маломощных транспортных средств.

## 2. Общие требования к раме квадроцикла с мотоциклетной посадкой

Разработка и создание маломощных транспортных средств на базе рам трубчатых профилей [2] определяется компоновкой узлов и агрегатов по условию определения посадки водителя и пассажира(ов) с размещением поворотного узла, багажного отсека или модуля, расположения двигателя и подвесок (рычаги подвесок и маятники), а также с определением расстояния между осями колёс и габарита по ширине. Комплексное проектирование и моделирование мотоциклетной посадки водителя определяется на основании компоновки условных посадочных точек. Такое условие называют посадочным треугольником (рис. 1). Точка удержания руля, точка опоры во время сидения и точка опоры на подножку назначают начальное правило при создании квадроцикла с мотоциклетной посадкой в условиях требований эргономики. В зависимости от размещения этих точек назначается комфортная посадка и безопасность рулевого управления.

Правильное размещение трёх точек формирует условие управляемости, моторики движения водителя во время поездки, когда человек-оператор транспортного средства при

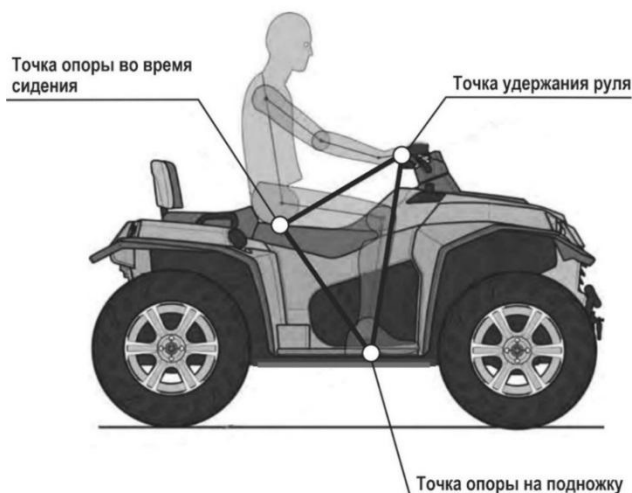


Рис. 1. Три точки для эргономического посадочного условия на квадроцикле

переносе своего веса разгружает или загружает переднюю или заднюю часть квадроцикла, чтобы скомпенсировать силы и центры масс. При высоком центре тяжести и узкой колёсной колее квадроцикл с водителем может перевернуться во время поворота или манёвра. При подъёме в гору водитель перемещает центр масс вперёд, чтобы скомпенсировать нагрузку во время движения, а когда происходит спуск с горы, то водитель отклоняется назад. Сразу можно определить то, что если сзади сидит пассажир, то ему нужно дополнительное расстояние на посадочном месте, чтобы водитель мог безопасно совершать движения своим телом. Водитель во время поездки находится всегда в подвижном состоянии, поэтому раскачивание и устойчивость транспортного средства определяется положением руля, а ноги являются опорой и держат его на сидении [4].

### 3. Общие требования к унификации и модернизации конструкции рамы

Построение формы трубчатой рамы должно назначать вариации расширения функционала от мотоцикла, далее к трициклу, квадроциклу и багги. Такой подход важен для потребительского значения, чтобы детали и технические узлы комплексно подходили для транспортных средств, а также имелось значение в расширении потребительского спроса с учётом цены продаж.

На рис. 2 и 3 представлены рамы квадро-

циклов с различными конфигурациями по топологии формообразования. Рама квадроцикла (рис. 2) создана только на базе профиля круглой трубы, а рама багги (рис. 3) имеет ещё и квадратные профили труб. По начальному условию необходимо задать некий закон переходящей формы рамы, например, от квадроцикла к раме – квадрицикла (багги), чтобы был большой спектр решений по унификации системы создания рам целой гаммы маломощных транспортных средств для различных потребительских нужд.



Рис. 2. Рама квадроцикла с размещением узлов и агрегатов



Рис. 3. Рама квадрицикла (багги)

На рис. 4 представлен вариант квадроцикла с общим набором деталей, узлов и агрегатов, где присутствуют дополнительные решения для качества эксплуатации: лебёдка, прицепное устройство, розетка для зарядки аккумулятора, транспортировочные кронштейны. Эти дополнительные части решают задачу сервисных функций транспортных средств, что позволяет расширить по-

требительский спрос для утилитарных и хозяйственных нужд.



Рис. 4. Составные узлы, агрегаты и комплектация квадроцикла

#### 4. Потребительские свойства квадроцикла

Качество транспортного средства – это совокупность комплекса потребительских свойств, обуславливающих его пригодность удовлетворять потребностям человека в соответствии со своим назначением. Очень важным условием является оценка обобщённых потребительских свойств для транспортных средств (рис. 5) [1, 6, 7].

К показателям потребительских свойств квадроцикла относятся единичные и обобщённые показатели (критерии), которые являются сложными нелинейными функциями конструктивных параметров и характеристик проектируемого квадроцикла и условий его эксплуатации, описывающие функциональные, эргономические, эстетические свойства, надёжность, безопасность, экономичность и др.). К единичному потребительскому свой-

ству квадроцикла можно отнести, например, конструктивную конфигурацию рамы с учётом покрытия (эстетическое качество внешнего вида).



Рис. 5. Обобщённые потребительские свойства транспортного средства

При проектировании маломощного транспортного средства разработчик должен представлять структуру (строение) проектируемой машины, упрощённая блок-схема которой представлена на рис. 6.

#### 5. Обобщённый алгоритм разработки рамы маломощного транспортного средства

В хребтовых рамах дополнительно функцию рамы выполняет двигатель, что снижает вес всего транспортного средства, но при этом надёжность и прочность корпуса двигателя должны быть на высоком уровне. В основном все рамы делаются достаточно сложной конфигурации и нет системного подхода, чтобы все решения имели единство исполнения, что очень важно для обеспечения невысокой себестоимости конечного изделия.

Для достижения наилучшего качества рамы маломощного транспортного средства необходимо придерживаться научного подхода или проектного алгоритма. На рис. 7 представлен алгоритм разработки рамы маломощного транспортного средства.

Данный алгоритм исключает ненужные задачи при конструкторской разработке рамы маломощного транспортного средства, что снижает трудозатраты на получение инновационных решений и новых вариантов

конструкции. Также данный подход задаёт размер и форму трубчатых деталей, которые могут быть унифицированными для различных конструкторских комбинаций и сочетаний, что также сократит временной интервал проектной работы и определит достаточно быстрый запуск продаж маломощного транспортного средства на рынок.

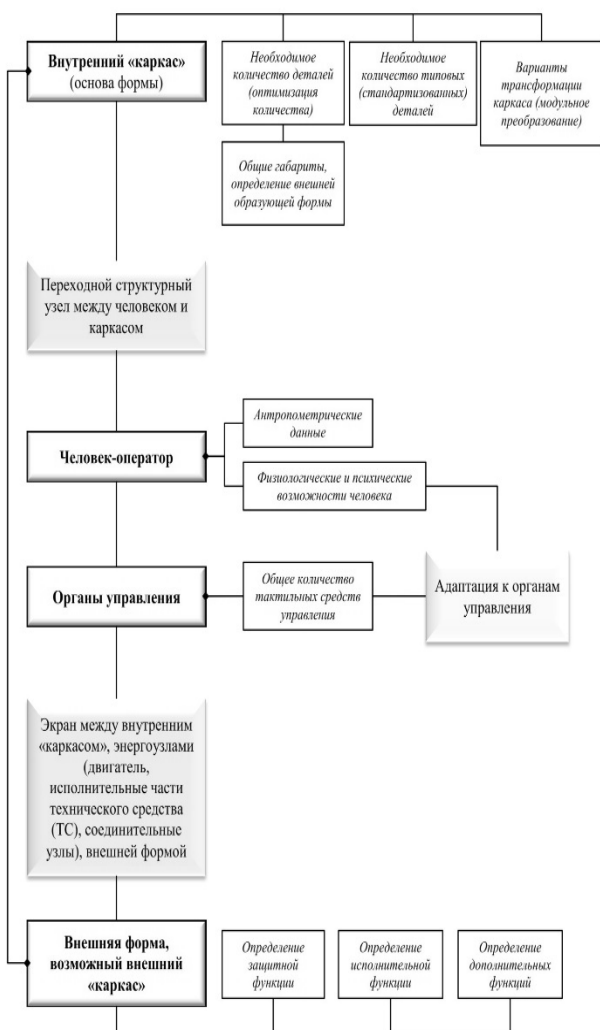


Рис. 6. Упрощённая блок-схема строения формы технического объекта или транспортного средства

Основные виды рам маломощных транспортных средств представлены на рис. 8.

## 6. Метод кубических форм и учет нормативных требований при создании рамы квадроцикла

На рис. 9 и 10 представлен метод кубического построения формы рамы квадроцикла

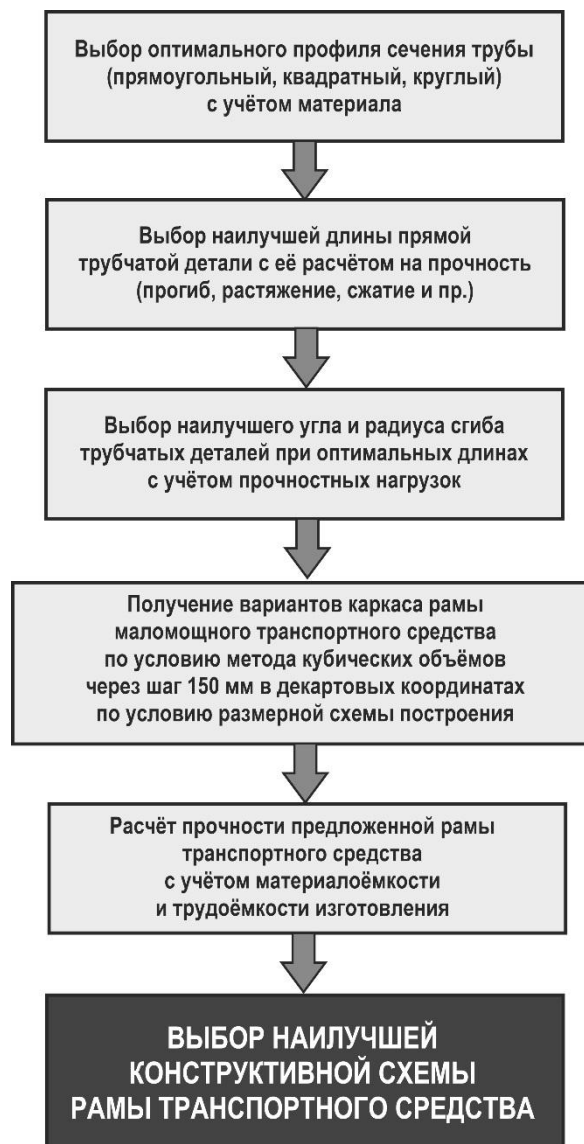


Рис. 7. Алгоритм разработки рамы маломощного транспортного средства

[3, 8, 9]. Метод кубического построения чётко намечает положения сгибов труб, а также углы сгибов, где формируется минимально достаточное количество деталей и количество мест определения сварных швов с целью снижения себестоимости изделия. Этот метод снижает расход материальных ресурсов и назначает надёжность и прочность изделия.

Описание в объёмном виде определяет то, что каждая деталь в изделии – это сочетание цилиндрических, конических, плоских и фасонных поверхностей. При этом механическая обработка деталей по разработанной технологии должна обеспечивать точность геометрических размеров и формы де-

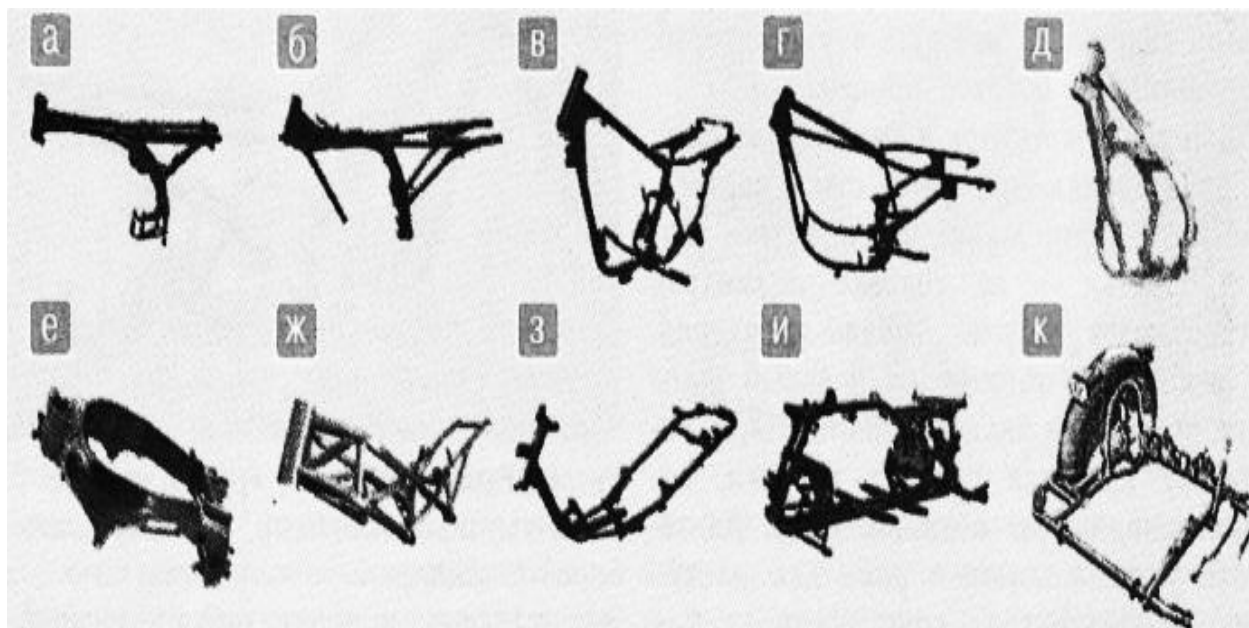


Рис. 8. Виды рам мототехники: а) хребтовая для мопедов и лёгких мотоциклов; б) одинарная незамкнутая для лёгких мотоциклов; в) одинарная замкнутая для средних мотоциклов; г) двойная (дуплексная) для средних и тяжёлых мотоциклов; д) полудуплексная; е) диагональная (чаще применяется для спортивных мотоциклов); ж) «крестовая» рама; з) рама скутера; и) рама квадроцикла; к) рама для бокового прицепа мотоцикла

тали, а также точность расположения стыковочных и примыкающих плоскостей.

Точность указанных размеров должна соответствовать допускам, которые нормируются ГОСТами. Различают номинальные, действительные и предельные размеры. В реальных условиях никогда не получится сделать любой размер в указанный номинал, поэтому и задаётся точность допуска. Рассматриваемая рама квадроцикла проектируется в условиях точности допусков от 10 до 14 качества в зависимости от размеров в длину для трубчатых деталей.

При стыковке трубчатых деталей всегда есть отклонение от оси, заданного угла в конкретной плоскости и перпендикуляра. Для оценки точности стыковки необходимо использовать количественные показатели [10, 11]. На рис. 11 представлена стыковка двух цилиндрических деталей, в частности трубчатых деталей, которые готовятся к проведению сварочных работ.

Диаметр  $D_n$  и радиус  $R$ , определяют размер вала в поперечном сечении. При этом контролируемым размером является радиус  $R$ , который функцией углы  $\varphi$  и координаты  $z$ . Например, для угловой координаты  $\varphi_1$

значение радиуса равно  $R_1$ . Любой контур поперечного сечения удовлетворяет так называемому условию замкнутости:

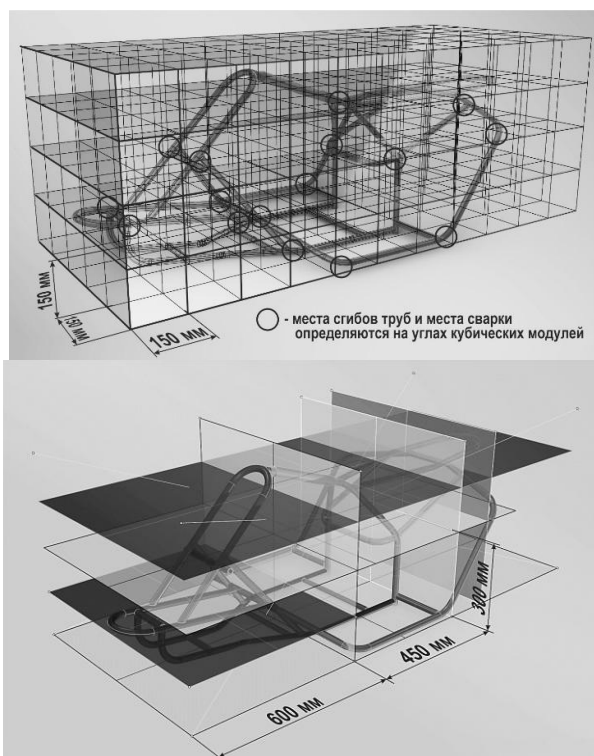


Рис. 9. Метод кубического построения рамы квадроцикла с условием контроля опорных плоскостей

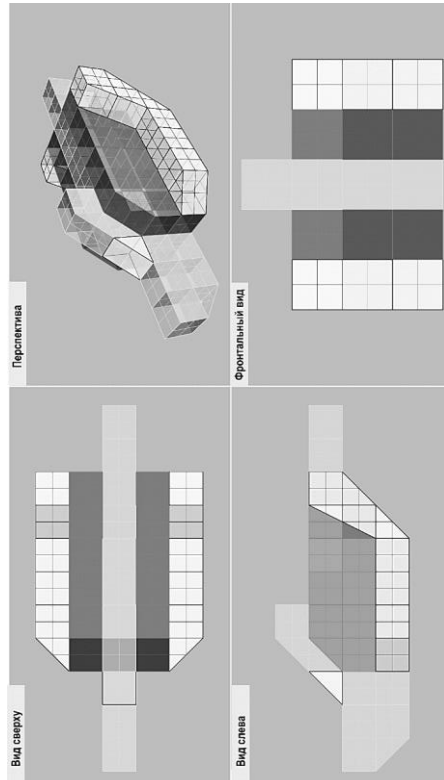


Рис. 10. Вычленение кубических форм для построения максимально точной геометрии рамы квадроицикла

$$f(\varphi) = f(\varphi + 2\pi),$$

где период функции равен  $2\pi$ .

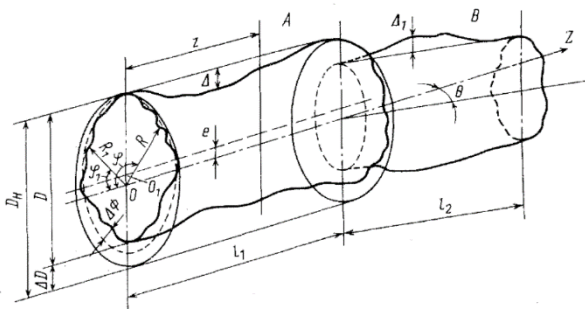


Рис. 11. Схема определения отклонений размеров, формы деталей и их взаимного расположения

В реальности размеры сечений по всей трубе неодинаковые, поэтому есть отклонение от круглости и появляются следующие расчётные величины:  $\Delta\Phi$ ,  $\Delta D$  и смещение от эксцентриситета  $e$ . Чем длиннее труба, тем вероятность смещения угла при сборке деталей становится выше. Для отклонения формы можно использовать методику на базе рядов Фурье. Для полярной системы координат

функцию погрешности точности профиля  $f(\varphi)$  рассматривают в следующем виде:

$$f(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\varphi + b_k \sin k\varphi),$$

где  $\frac{a_0}{2}$  – нулевой член разложения, который не зависит от координат окружности и относится к условию деформации от оси симметрии;  $a_k$ ,  $b_k$  – коэффициенты ряда Фурье  $k$ -й гармоники;  $k$  – порядковый номер соответствующей гармоники.

Понятие гармоника – это неровность формы детали или сборки. На рис. 12 представлена сварка двух труб, которая определяет то, что на всю длину  $L = L_1 + L_2$  имеются неодинаковые диаметры сечений  $D_n$ , которые могут также быть расположены под углом и они формируют кривизну поверхности и отклонение  $\Delta$  для диаметров, радиусов, углов, амплитуд кривизны, длин и пр. Само сечение может иметь форму овала, а также в своей плоскости может быть ещё и искривлено. Реальная практика показывает то, что фактически идеальных деталей не существует, но надо стремиться к точности соединений путем установки правильных (реальных) допусков.

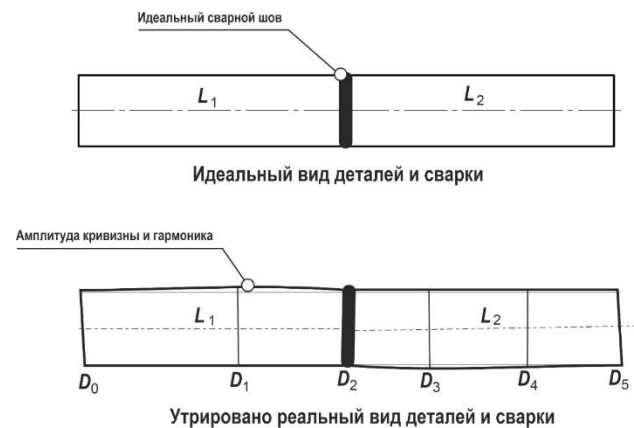


Рис. 12. Идеальный и реальный виды деталей и сварки

Отметим, что для определения точности изготовления деталей и их сборки также можно использовать тригонометрический полином:

$$f(\varphi) = \frac{C_0}{2} + \sum_{k=1}^n C_k (\cos k\varphi + \varphi_k),$$



где  $n$  – порядковый номер гармоники;  $C_0/2$  – отклонение размера в линейных, декартовых и полярных координатах.

Рассмотренный выше метод кубического построения форм рам квадроцикла, который рекомендуется применять при проектировании рамы квадроцикла, уменьшает погрешности при стыковке сварных швов (рис. 13).

Вариант 1 является самым простым при перпендикулярной или угловой сварной стыковке, но требует высокое качество сварного шва, чтобы геометрия рамы не имела кардинальных термических деформаций. Вариант 2 с подрезкой трубы является самым логичным, но трудоёмкость получения детали формируется дополнительной технологической операцией. Вариант 3 требует чёткой соосности, т.к. даже при незначительном угле отклонения точность рамы кардинально снижается, потому что реальная длина рамы квадроцикла более 1,5 м.

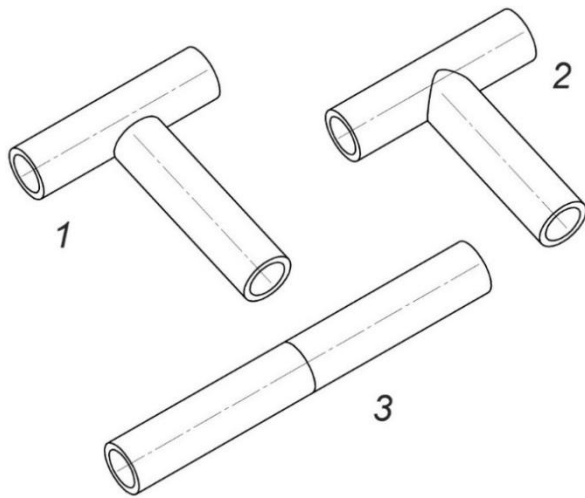


Рис. 13. Виды сварных стыковок труб в раме квадроцикла

### Список литературы

1. Умняшкин В.А., Филькина А.Н., Ившин К.С., Скуба Д.В. Автомобили особо малого класса (квадрициклы) с гибридной энергосиловой установкой / Под общ. ред. В.А. Умняшкина. Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. 138 с.

2. Далида Н.В., Филькин Н.М. Создание квадроцикла мотоциклетной посадки

### 6. Заключение

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

- при создании квадроцикла с мотоциклетной посадкой водителя для обеспечения эргономических свойств необходимо в начале обосновать три базовых точки – это точка удержания руля, точка опоры во время сидения и точка опоры на подножку;

- при создании маломощных транспортных средств важным вопросом проектирования является обеспечение требований унификации и модернизации конструкции рамы;
- метод кубического построения формы является эффективным методом трехмерного моделирования при решении проблем проектирования рамы квадроцикла;

- при создании рамы квадроцикла из трубчатых профилей необходимо уделять особое внимание оценке точности стыковки трубчатых деталей, что влияет на эксплуатационные свойства квадроцикла в целом;

- разработанные методические аспекты создания рам маломощных транспортных средств являются основой методики проектирования и конструирования несущих систем такого типа машин.

В работе достигнута основная поставленная цель исследований – разработаны методические аспекты создания рам маломощных транспортных средств.

Полученные результаты исследований могут применяться в научно-исследовательских, конструкторских и других организациях при создании новых и модернизации выпускаемых маломощных транспортных средств.

### References

1. Umnyashkin V.A., Filkina A.N., Ivshin K.S., Skuba D.V. *Avtomobili osobo malogo klassa (kvadricikly) s gibridnoy energosilovoy ustanovkoy* [Especially small class cars (quadricycles) with hybrid power plant]. Izhevsk, NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2004. 138 p. (In Russian)

2. Dalida N.V., Filkin N.M. *Sozдание kvadrocikla mototsikletnoy posadki na osnove*

на основе трубчатых профилей несущей системы // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2022. С. 97.

3. Далида Н.В., Филькин Н.М. Новый подход к формообразованию транспортных средств // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства». Ижевск: ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. С. 56-63.

4. Далида Н.В., Скуба Д.В., Филькин Н.М. 3D технологии при создании мало-мощного транспортного средства (квадроцикла) с мотоциклетной посадкой водителя и пассажиров // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции «3D технологии в решении научно-практических задач». Красноярск: СибГУ. 2022. С. 168-172.

5. Филькин Н.М., Далида Н.В. Расчет показателей надежности транспортной машины на стадии проектирования на примере квадроцикла // Сборник научных трудов по материалам 81-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ «Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта». Москва: МАДИ. 2023. С. 199-203.

6. Умняшкин В.А., Сазонов В.В., Филькин Н.М. Эксплуатационные свойства автомобиля. Ижевск: Издательство ИжГТУ, 2002. 180 с.

7. Филькин Н.М. Оптимизация параметров конструкции энергосиловой установки транспортной машины. Дис. ... д-ра техн. наук. Ижевск: ИжГТУ, 2001. 430 с.

8. Далида Н.В., Филькин Н.М. Построение рамы квадроцикла по принципу кубических объемов // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции «Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства». Ижевск: ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. С. 64-67.

*trubchatykh profiley nesushchey sistemy* [Creation of a motorcycle landing ATV based on tubular profiles of the carrier system]. In: *Novye materialy, oborudovanie i tekhnologii v promyshlennosti: materialy Mezhdunar. nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Mogilev, Belorussko-Rossiyskiy universitet, 2022, p. 97. (In Russian)

3. Dalida N.V., Filkin N.M. *Novyy podkhod k formoobrazovaniyu transportnykh sredstv* [A new approach to vehicle shaping]. In: *Materialy VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Avtomobilestroenie: proektirovanie, konstruirovanie, raschet i tekhnologii remonta i proizvodstva»*. Izhevsk, IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2022, pp. 56-63. (In Russian)

4. Dalida N.V., Skuba D.V., Filkin N.M. *3D tekhnologii pri sozdanii malomoshchnogo transportnogo sredstva (kvadrotsikla) s mototsikletnoy posadkoy voditelya i passazhirov* [3D technologies in the creation of a low-power vehicle (ATV) with a motorcycle landing of the driver and passengers]. In: *Sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «3D tekhnologii v reshenii nauchno-prakticheskikh zadach»*. Krasnoyarsk, SibGU, 2022, pp. 168-172. (In Russian)

5. Filkin N.M., Dalida N.V. *Raschet pokazateley nadezhnosti transportnoy mashiny na stadii proektirovaniya na primere kvadrotsikla* [Calculation of reliability indicators of a transport vehicle at the design stage using the example of an ATV]. In: *Sbornik nauchnykh trudov po materialam 81 nauchno-metodicheskoy i nauchno-issledovatel'skoy konferentsii MADI «Aktualnye voprosy tekhnicheskoy ekspluatatsii i avtoservisa podvizhnogo sostava avtomobilnogo transporta»*. Moscow, MADI, 2023, pp. 199-203. (In Russian)

6. Umnyashkin V.A., Sazonov V.V., Filkin N.M. *Ekspluatatsionnye svoystva avtomobilya* [Operational properties of the car]: *Uchebnoe posobie po discipline «Teoriya avtomobilya»*. Izhevsk, Izdatelstvo IzhGTU, 2002. 180 p. (In Russian)

7. Filkin N.M. *Optimizatsiya parametrov konstruksii energosilovoy ustanovki*

9. Далида Н.В., Филькин Н.М. Формообразование при проектировании транспортных средств на базе трехмерных кубических форм // Сборник статей по материалам третьей Всероссийской научно-практической конференции. «Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации». Белебей: СамГТУ, 2022. С. 39-45.

10. Технология машиностроения: В 2 т. Т. 1. Основы технологии машиностроения / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, А.М. Дальский и др.; Под ред. А.М. Дальского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 564 с.

11. Технология машиностроения: В 2 т. Т. 2. Производство машин / В.М. Бурцев, А.С. Васильев, О.М. Деев и др.; Под ред. Г.Н. Мельникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 640 с.

*transportnoy mashiny* [Optimization of the design parameters of the power plant of the transport vehicle]. Diss. Doct. Sci. (Engineering). Izhevsk. 2001. 430 p. (In Russian)

8. Dalida N.V., Filkin N.M. *Postroenie ramy kvadrotsikla po printsipu kubicheskikh obemov* [Construction of the ATV frame on the principle of cubic volumes]. In: *Materialy VI Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Avtomobilestroenie: proektirovaniye, konstruirovaniye, raschet i tekhnologii remonta i proizvodstva»*. Izhevsk, IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2022, pp. 64-67. (In Russian)

9. Dalida N.V., Filkin N.M. *Formoobrazovanie pri proektirovaniy transportnykh sredstv na baze trekhmernykh kubicheskikh form* [Shaping in the design of vehicles based on three-dimensional cubic shapes]. In: *Sbornik statey po materialam 3 Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Sovremennaya nauka: aktualnye problemy, dostizheniya i innovatsii»*. Belebey, SamGTU, 2022, pp. 39-45. (In Russian)

10. *Tekhnologiya mashinostroeniya: V 2 t. T. 1. Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Mechanical engineering technology: In 2 vols. Vol. 1. Fundamentals of mechanical engineering technology]. Ed. A.M. Dalskiy. Moscow, MGTU imeni N.E. Bauman, 2001. 564 p. (In Russian)

11. *Tekhnologiya mashinostroeniya: V 2 t. T. 2. Proizvodstvo mashin* [Mechanical engineering technology: In 2 vols. Vol. 2. Production of machines]. Ed. G.N. Melnikov. Moscow, MGTU imeni N.E. Bauman, 2001. 640 p. (In Russian)

УДК (UDS) 621.86

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ ГРУЗОВЫХ ТЕЛЕЖЕК КРАНОВ МОСТОВОГО ТИПА С УНИВЕРСАЛЬНОЙ КОМПОНОВОЧНОЙ СХЕМОЙ****EXPERIMENTAL STUDY OF THE DEFORMED STATE OF METAL STRUCTURES OF LOAD TROLLEYS OF OVERHEAD CRANES WITH A MULTIPURPOSE LAYOUT DRAWING**Денисов И.А.  
Denisov I.A.Брянский государственный технический университет (Брянск, Россия)  
Bryansk State Technical University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** Деформации несущих металлоконструкций машин различного назначения, возникающие во время эксплуатации, оказывают существенное влияние на работоспособность установленного на них оборудования. Недостаточная жёсткость металлоконструкции может служить причиной заклинивания и выхода из строя элементов привода и рабочих органов подъёмно-транспортной, строительной и дорожной техники, работа которой связана с воздействием высоких статических и динамических нагрузок. Следовательно, при проектировании новых конструктивных схем несущих металлоконструкций особое внимание необходимо уделять вопросу обеспечения необходимой жёсткости. Представленная работа содержит результаты экспериментальной оценки деформированного состояния физических моделей металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа, выполненных на основе универсальной компоновочной схемы с использованием различных типов соединений несущих элементов. В статье отражена информация о методике экспериментального исследования, описаны особенности физических моделей металлоконструкций, используемых в ходе эксперимента. Приведены данные о вертикальных перемещениях контрольных точек металлоконструкций при использовании различных схем нагружения. Произведена оценка влияния типа применённых соединений несущих элементов на особенности возникающего деформированного состояния металлоконструкций. Выполнен сравнительный анализ экспериментальных данных и расчётных величин вертикальных перемещений точек металлоконструкций, полученных в результате компьютерного моделирования деформированного состояния с использованием различных конечно-элементных моделей.

**Ключевые слова:** мостовой кран, грузовая тележка, металлоконструкция, универсальная компоновочная схема, экспериментальные исследования, деформации.

**Abstract.** Deformations of the supporting metal structures of machines for various purposes have a significant impact on the performance of the equipment installed on them. Insufficient rigidity of a metal structure can cause jamming and failure of drive elements and working bodies of material handling, construction and road machines, the operation of which is associated with the impact of high static and dynamic loads. Therefore, when designing new structural schemes of load-bearing metal structures, special attention must be paid to the issue of ensuring the necessary rigidity. The presented work contains the results of an experimental assessment of the deformed state of physical models of the metal structures of load trolleys of overhead cranes, made on the basis of a multipurpose layout drawing using various types of connections of bearing elements. The article reflects information about the methodology of experimental research, describes the features of the physical models of metal structures used in the course of the experiment. The data on the vertical displacements of the control points of metal structures when using various loading schemes are given. An assessment was made of the influence of the type of applied connections of load-bearing elements on the features of the resulting deformed state of the metal structure. A comparative analysis of experimental data and calculated values of vertical displacements of points of metal structures obtained as a result of computer simulation of the formed state using various finite element models is performed.

**Keywords:** overhead crane, load trolley, metal structures, multipurpose layout drawing, experimental studies, deformations.

Дата принятия к публикации: 03.02.2023 † Date of acceptance for publication: 03.02.2023  
Дата публикации: 25.03.2023 † Date of publication: 25.03.2023

#### Сведения об авторах: †

Денисов Илья Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Подъемно-транспортные машины и оборудование» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», e-mail: ilia.denisow@yandex.ru †

#### Author's information: †

Илья А. Denisov – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Handling machinery and equipment" at Bryansk State Technical University, e-mail: ilia.denisow@yandex.ru †

## 1. Введение

Многие современные сооружения, воспринимающие значительные внешние статические и динамические нагрузки, выполняются с применением решётчатых и каркасно-ячеистых металлоконструкций. Данные металлоконструкции выполняются из унифицированных по своим параметрам и функциям элементов, которые объединяясь в узлах формируют решётку несущего каркаса, состоящую из отдельных ячеек. По описанному принципу выполняются несущие конструкции многих современных зданий со сложной геометрией, опорные металлоконструкции летательных и космических аппаратов.

Решётчатые и ячеисто-каркасные металлоконструкции имеют сравнительно небольшой вес при высоких показателях прочности, долговечности и надёжности. Применение подобных конструкций может быть оправдано в случаях, когда необходимо создать равнопрочную несущую основу, способную воспринимать значительные распределённые нагрузки или системы сосредоточенных сил, действующих на металлоконструкцию со стороны установленного на ней оборудования.

Металлоконструкции, схожие по своей структуре и конфигурации с решётчатыми и каркасно-ячеистыми могут применяться при проектировании технологических и транспортных машин. В качестве примера можно привести металлоконструкции грузовых тележек кранов мостового типа, выполненные на основе универсальных компоновочных схем. Конструктивные схемы и принципы проектирования данных металлоконструкций описаны в работах [1-7]. В состав универсальной компоновочной схемы металлоконструкции грузовой тележки входят три

основных типа элементов (рис. 1): диагональные элементы, которые пространственно разделяют металлоконструкцию на 4 сегмента, а также хордовые и радиальные элементы, заполняющие каждый сегмент. Соединяясь между собой данные элементы образуют прочную конструкцию, способную нести на себе узлы механизмов грузоподъемной машины, которая обладает следующими достоинствами [1, 2, 6]:

1. Сравнительно малой массой и высокой несущей способностью.

2. Структурной универсальностью, позволяющей относительно свободно задавать положение несущих элементов металлоконструкции тележки отталкиваясь от компоновки размещаемых на ней механизмов.

3. Высокой надёжностью, так как при возникновении дефекта в одном из элементов металлоконструкции внутренние усилия перераспределяются между остальными элементами, что предотвращает мгновенное разрушение рамы тележки и возникновение аварийной ситуации.

4. Высокой жёсткостью.

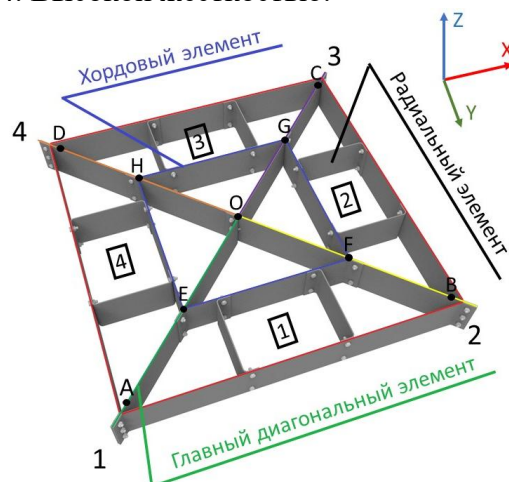


Рис. 1. Металлоконструкция грузовой тележки на основе универсальной компоновочной схемы

Следует отметить, что жёсткость несущей металлоконструкции является важным критерием, который определяет работоспособность и долговечность грузоподъёмных и специальных транспортных машин [8 - 10]. При недостаточной жёсткости возникающие от воздействия внешних нагрузок упругие деформации металлоконструкции способствуют появлению погрешностей расположения элементов рабочих механизмов транспортного-технологических машин, которые в свою очередь приводят к ускоренному износу и заклиниванию элементов привода.

Высокая жёсткость и несущая способность металлоконструкций на основе универсальной компоновочной схемы была подтверждена экспериментально в работах [1, 2]. В частности, было показано, что физическая модель данной металлоконструкции может воспринимать нагрузку в 21 раз превышающую свой собственный вес, находясь при этом в упругом состоянии, которое характеризуется отсутствием заметных пластических деформаций и небольшими вертикальными перемещениями характерных точек.

Однако из практики проектирования известно, что тип соединений несущих элементов металлоконструкции может оказывать значительное влияние на величину возникающих в ней деформаций и общий характер действующего напряжённо-деформированного состояния. Жёсткость металлоконструкций со значительным количеством резьбовых соединений может снижаться за счёт местных податливостей отдельных участков соединений, вызванных ослаблением затяжки, непропорциональной деформацией винтов или болтов, разностью между диаметрами отверстия и цилиндрических поверхностей болтов. В случае использования сварных соединений пластические свойства сварных швов и околошовной зоны могут способствовать увеличению значений перемещений отдельных точек металлоконструкции под воздействием рабочих нагрузок. Указанные факторы наиболее сильно проявляются в пространственных металлоконструкциях с большим количеством соединений несущих элементов, к числу которых относятся металлоконструкции, выполненные на

основе универсальных компоновочных схем. Отсюда вытекает необходимость полноценной оценки степени влияния типа использованных соединений на величину и закономерность распределения деформаций, действующих в металлоконструкциях данного типа. Проведение подобной оценки является главной целью настоящего исследования.

## 2. Методика экспериментального исследования

Для достижения поставленной цели было проведено экспериментальное исследование с применением физических моделей металлоконструкций, отличающихся использованным типом соединений несущих элементов. В процессе исследования необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать физические модели металлоконструкций на основе универсальной компоновочной схемы со сварными и болтовыми соединениями, позволяющие корректно и с достаточной точностью получить требуемые экспериментальные данные.

2. Количественно оценить деформации, возникающие в характерных точках металлоконструкций при различных способах приложения внешних нагрузок.

3. Исходя из полученных данных выявить основные особенности деформированного состояния металлоконструкций с различными типами соединений несущих элементов.

4. Произвести сравнение значений деформаций, полученных экспериментально, с расчётными значениями для оценки возможности использования различных конечно-элементных моделей при моделировании деформированного состояния металлоконструкций со сварными и болтовыми соединениями.

Для проведения экспериментального исследования были подготовлены две физические модели металлоконструкции, содержащие в себе диагональные, хордовые и радиальные элементы (рис. 2).

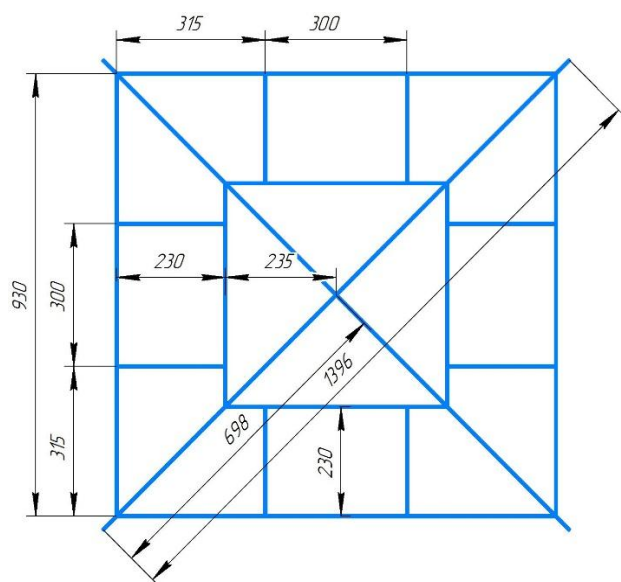
Обе физические модели были изготовлены из листовой горячекатаной малоуглеродистой стали Ст3пс толщиной 3 мм. Модель металлоконструкции с болтовыми сое-



а



б



в

Рис. 2. Физические модели металлоконструкций с универсальной компоновочной схемой: а – модель с болтовыми соединениями; б – модель со сварными соединениями; в – геометрические размеры моделей, мм.

динениями (рис. 2, а) использовалась при проведении исследований, описанных в работах [1, 2]. Для соединения несущих элементов данной модели были применены болты М8-6g×20 ГОСТ 7798-70 с классом прочности 5.8. Физическая модель сварной металлоконструкции (рис. 2, б) выполнена с помощью двухсторонних угловых сварных швов с катетом 3 мм. Обе модели имеют одинаковые геометрические параметры, показанные на рис. 2, в.

Деформации физических моделей в рамках эксперимента оценивались путём измерений вертикальных перемещений характерных контрольных точек, которые выбирались по следующим соображениям:

1. Контрольные точки необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечить простоту и минимальную трудоёмкость проведения замеров их вертикальных перемещений без применения сложного оборудования и с максимальной точностью.

2. Для полноценной и объективной оценки деформированного состояния металлоконструкции контрольные точки, используемые в рамках экспериментального исследования, должны характеризовать вертикальные перемещения нескольких расположенных по соседству несущих элементов [1, 2].

Исходя из описанных соображений в качестве контрольных рационально выбирать точки, соответствующие узлам соединения элементов, в которых ожидается возникновения наибольших по величине деформаций. К таким точкам можно отнести точки Н, Г, Е, Ф, принадлежащие узлам соединения диагональных и хордовых элементов, а также точку О, соответствующую центральному узлу соединения диагональных элементов. В рамках предшествующих экспериментальных исследований [1, 2] было установлено, что вертикальные перемещения точек А, В, С, D пренебрежимо малы, трудноизмеримы и поэтому не представляют исследовательской ценности в рамках проводимого эксперимента. Однако положение данных точек необходимо отслеживать для контроля возникновения нежелательных перемещений опор физической модели относительно вертикальной оси, появление которых может

привести к существенному искажению данных, полученных при измерении перемещений основных контрольных точек [1, 2].

Измерения вертикальных перемещений контрольных точек физических моделей производились при помощи индикаторов часового типа ИЧ-10 ГОСТ 577-68, позволяющих измерять линейные перемещения величиной до 10 мм с погрешностью 20 мкм. Цифровые индикаторы закреплялись на жёстких индикаторных стойках (рис. 3), после чего размещались под исследуемой физической моделью таким образом, чтобы измерительная головка индикатора контактировала с точкой металлоконструкции, перемещение которой необходимо было определить в ходе исследования. После установки в рабочую позицию оси всех индикаторов выставлялись строго вертикально для минимизации погрешностей измерений.

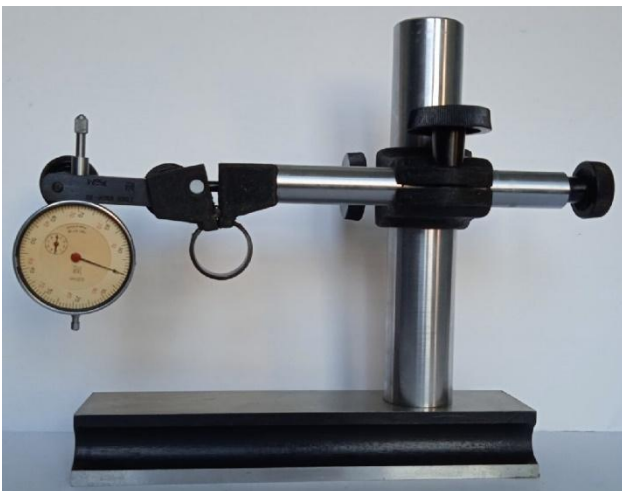


Рис. 3. Стойка с измерительным индикатором часового типа.

В ходе проведения эксперимента для создания внешней нагрузки на исследуемые физические модели были использованы испытательные грузы в виде семи плит общей массой 707,6 кг. Для локализации мест приложения нагрузок от веса испытательных грузов использовались деревянные передаточные подкладки, которые размещались между плитами и металлоконструкцией. Использование подкладок позволило производить точечное нагружение необходимых несущих элементов [1, 2].

Для формирования наиболее подробной картины деформированного состояния и оценки влияния схемы расположения элементов металлоконструкции на величину возникающих деформаций каждая физическая модель нагружалась согласно четырём различным схемам нагружения, предложенным в работе [2]. Отличие данных схем состоит в расположении испытательных грузов на металлоконструкции.

Схема нагружения №1 (рис. 4, а) предназначена для изучения наибольших возможных деформаций диагональных элементов. Нагрузка от веса испытательного груза при помощи двух подкладок шириной 40 мм равномерно распределяется между четырьмя диагональными элементами. При этом на контактную площадку каждого диагонального элемента длиной 57 мм и шириной 3 мм действует распределённая нагрузка интенсивностью  $10,22 \text{ Н/мм}^2$  [1, 2].

Схема нагружения №2 предназначена для изучения деформированного состояния модели в случае, когда основная нагрузка действует на радиальные элементы одного сектора. Нагрузка от веса всего испытательного груза через передаточную подкладку шириной 145 мм равномерно распределяется между параллельными радиальными элементами (рис. 4, б). В частности, на каждый из двух радиальных элементов сектора №2 физической модели металлоконструкции (рис. 1) будет действовать распределённая нагрузка интенсивностью  $7,98 \text{ Н/мм}^2$  [1, 2].

Схема нагружения №3 используется для изучения деформированного состояния физической модели металлоконструкции в случае её нагружения в области соединения диагональных и хордовых элементов (рис. 4, в). Центр тяжести испытательного груза размещается над точкой F, при этом нагрузка от его веса через передаточную подкладку длиной 200 мм и шириной 145 мм распределяется между одним диагональным, двумя хордовыми и двумя радиальными элементами металлоконструкции. Интенсивности полученной таким образом распределённой нагрузки составляет  $3,09 \text{ Н/мм}^2$  [1, 2].

Схема нагружения №4 используется для изучения деформированного состояния мо-



дели в случае нагружения радиальных элементов противоположно расположенных секторов (рис. 4, в). В частности, одна часть испытательного груза массой 304,3 кг воздействует на радиальные элементы сектора №2, вторая часть испытательного груза массой 403,3 кг нагружает радиальные элементы сектора №4. При этом нагрузка от веса указанных масс распределяется поровну между радиальными элементами одного сектора и передаётся на них через подкладку шириной 145 мм. В этом случае на каждый элемент

сектора №2 будет действовать распределённая нагрузка интенсивностью  $3,43 \text{ Н/мм}^2$ , а каждый радиальный элемент сектора №4 воспримет распределённую нагрузку интенсивностью  $4,55 \text{ Н/мм}^2$  [1, 2].

Экспериментальные исследования каждой физической модели проводились по следующему алгоритму:

1. Фиксируются показания индикаторов, размещённых под контрольными точками металлоконструкции О, Н, Г, Е, F в ненагруженном состоянии.



а



б



в



г

Рис. 4. Схемы нагружения физической модели металлоконструкции, используемые в ходе проведения экспериментального исследования: а – схема нагружения №1; б – схема нагружения №2; в – схема нагружения №3; г – схема нагружения №4

2. Выполняется нагружение несущих элементов согласно с реализуемой схемой нагружения металлоконструкции.

3. Фиксируются показания индикаторов при деформированном состоянии металлоконструкции.

4. Вычисляются разности показаний индикаторов при деформированном и ненагруженном состоянии металлоконструкции, определяются вертикальные перемещения контрольных точек O, H, G, E, F.

5. Выполняется снятие нагрузки с металлоконструкции, по показаниям индикаторов осуществляется контроль наличия остаточных пластических деформаций.

Описанная последовательность операций повторяется для каждой схемы нагружения.

Экспериментальные данные, полученные в ходе проведённых измерений, позволяют оценить обоснованность использования различных типов конечно-элементных моделей для компьютерного моделирования деформированного состояния металлоконструкций на основе универсальных компоновочных схем. Данная оценка может быть произведена путём сравнения экспериментальных данных, с величинами вертикальных перемещений, полученных в ходе численных расчётов с использованием метода конечных элементов.

Для моделирования деформированного состояния металлоконструкции со сварными соединениями была использована твердотельная конечно-элементная модель, включающая в себя 49056 плоских четырёхугольных конечных элементов (рис. 5, а). Соединения отдельных несущих элементов металлоконструкции производится непосредственной сшивкой соответствующих узлов конечных элементов модели. Использование подобных конечно-элементных моделей позволяют значительно снизить трудоёмкость процесса моделирования и ускорить процесс вычислений.

В работах [1, 2, 7] на основании проведённых сравнительных расчётов было показано, что при построении конечно-элементных моделей, предназначенных для определения величин упругих деформаций, в равной степени могут быть использованы как плоские, так и объёмные конечные эле-

менты. С учетом данного обстоятельства для оценки влияния болтовых соединений на деформированное состояние металлоконструкции была разработана конечно-элементная модель, состоящая из объёмных четырехугольных конечных элементов. Элементы болтовых соединения моделировались в виде отдельных тел с наложенными на них связями (рис. 5, б). Взаимодействие между сопряжёнными поверхностями несущих элементов металлоконструкции и элементами болтовых соединений моделировались с помощью наложения фрикционных контактных взаимодействий с коэффициентом сухого трения 0,16. Контакты между болтами и гайками в рамках соединений моделировались с помощью абсолютно жёстких контактных взаимодействий не допускающих взаимных перемещений и поворотов тел относительно координатных осей [1, 2].

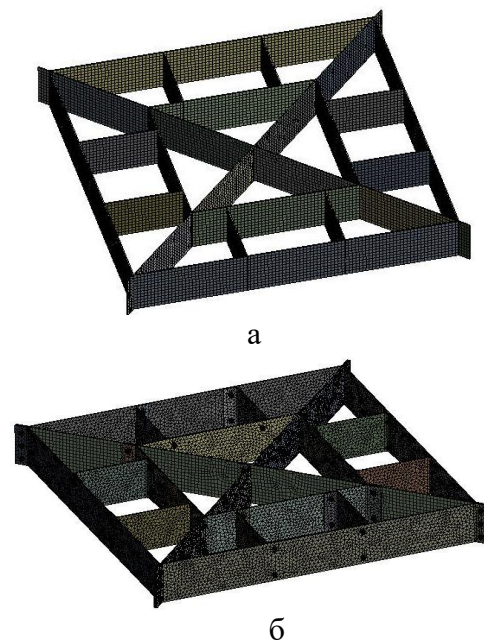


Рис. 5. Конечно-элементные модели металлоконструкций грузовых тележек с универсальной компоновочной схемой: а – модель металлоконструкции со сварными соединениями; б – модель металлоконструкции с болтовыми соединениями

Параметры конечных элементов и ограничения конечно-элементных моделей задавались согласно рекомендациям, описанным в работах [1, 2]. Моделирование производи-

лось с применением программных пакетов Femap и Siemens NX.

### 3. Результаты экспериментального исследования

Полученные в ходе экспериментального исследования картины деформаций физических моделей металлоконструкций с различным типом соединений несущих элементов представлены на рис. 6. Информация о каждой контрольной точке в рамках данных картин представлена тремя числовыми значениями. Над разделительным штрихом приведена величина вертикального перемещения контрольной точки, полученная в ходе проведения расчётов с использованием соответствующей конечно-элементной модели. Вертикальные перемещения точки, измеренные в ходе проведения экспериментального исследования размещены под разделительным штрихом. Справа от приведённых числовых значений размещена их относительная процентная разница. Для визуализации полученных результатов вертикальные перемещения контрольных точек отложены на приведённых картинах деформаций в увеличенном масштабе. Положения, которые точки принимают в результате деформации металлоконструкции под соответствующей нагрузкой соединены линиями.

В случае нагружения металлоконструкции по схеме № 1 максимальные по величине деформации наблюдаются у точки О, принадлежащей центральному узлу тележки (рис. 6, а, б). По данным, полученным в ходе численного моделирования деформированного состояния металлоконструкции с болтовыми соединениями заметно, точки Н (1,386 мм) и F (1,34 мм) испытывают большие перемещения чем точки G (1,079 мм) и E (1,082 мм). Данный факт объясняется особенностью конструктивного исполнения центрального узла соответствующей физической модели в котором два диагональных элемента, расположенных по оси Е-Г, присоединяются к диагонали F-Н, выполненной в виде единой неразборной пластины. Несколько иная картина деформации складывается по результатам экспериментального ис-

следования физической модели с болтовыми соединениями. В данном случае перемещения контрольных точек G (1,43 мм) и E (1,53 мм) отличаются незначительно, а перемещение точки Н (1,65 мм) заметно превышает перемещение точки F (1,36 мм). Вертикальные перемещения контрольных точек E, F, G, Н конечно-элементной модели сварной металлоконструкции крайне близки по величине и равны приблизительно 0,5 мм. Данные экспериментального исследования показывают, что физическая модель металлоконструкции со сварными соединениями обладает большей жёсткостью, чем аналогичная модель с болтовыми соединениями. При этом перемещения точек Н (0,86 мм) и F (0,83 мм) превышают перемещения точек G (0,71 мм) и E (0,74 мм).

В случае приложения нагрузки к радиальным элементам одного сектора (схема нагружения №2) металлоконструкции перемещения контрольных точек G и F, принадлежащих данному сектору, превышают перемещения центрального узла в точке О и перемещения точек противоположного сектора Н и E (рис. 6, в, г). Указанные соотношения перемещений наблюдаются и в металлоконструкциях со сварными соединениями, и в металлоконструкциях с болтовыми соединениями, что подтверждается расчётными и экспериментальными данными.

При приложении внешней нагрузки по схеме нагружения №3 можно наблюдать отличия в характере деформаций металлоконструкций с различными типами соединений (рис. 6, д, е). В металлоконструкции с болтовыми соединениями несущих элементов наибольшие вертикальные перемещения происходят в точке О, при этом контрольная точка F, над которой располагается центр тяжести испытательных грузов испытывает меньшие перемещения. В металлоконструкции со сварными соединениями вертикальные перемещения точки F превышают вертикальные перемещения точки О. Полученные соотношения перемещений точек подтверждаются расчётными и экспериментальными данными. Отмеченные отличия в картинах деформаций объясняются различной жёсткостью болтовых и сварных соединений.

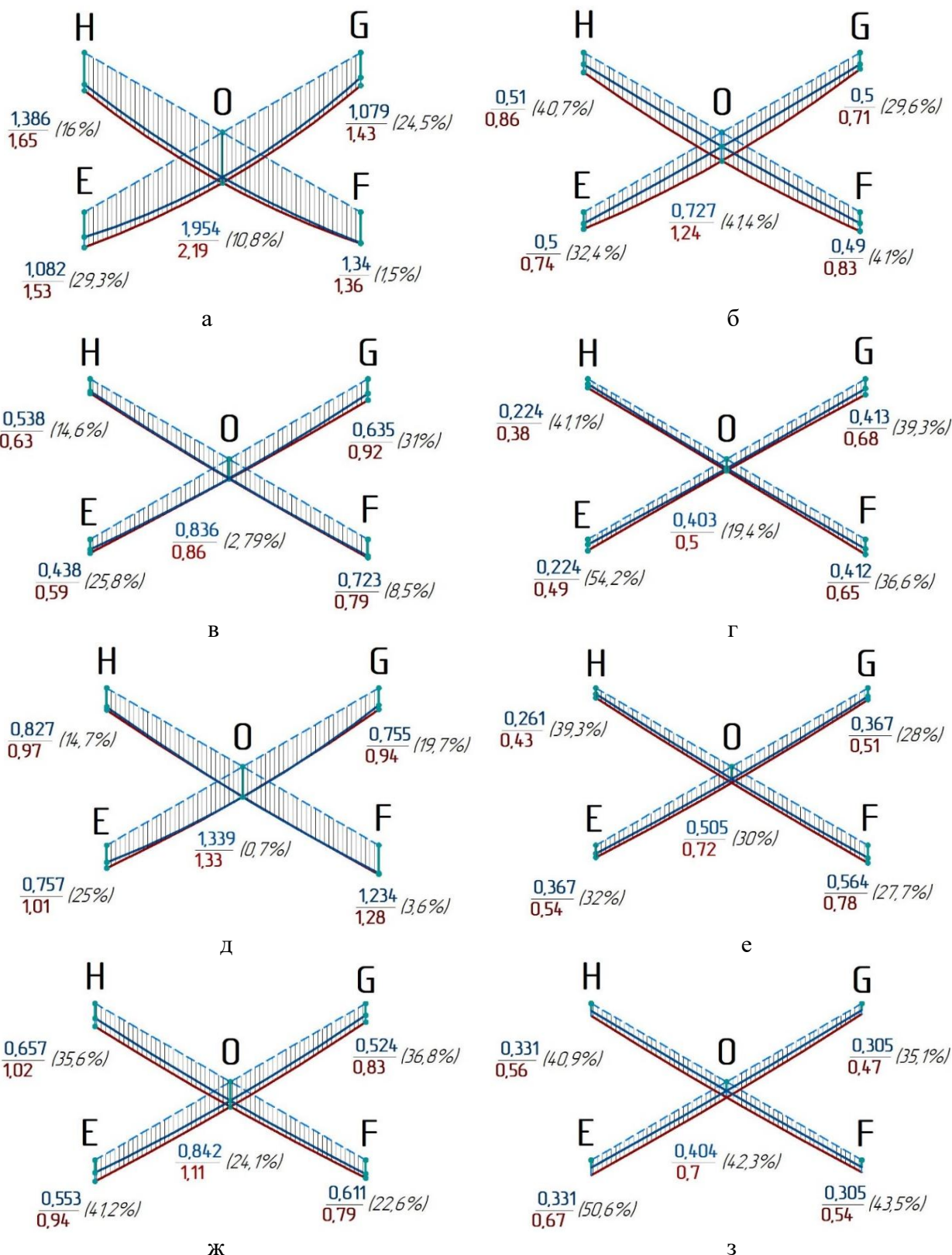


Рис. 6. Картины деформаций физических моделей металлоконструкции грузовой тележки с универсальной компоновочной схемой: а, б – картины деформаций болтовой и сварной модели при нагружении по схеме №1; в, г – картины деформаций болтовой и сварной модели при нагружении по схеме №2; д, е – картины деформаций болтовой и сварной модели при нагружении по схеме №3; ж, з – картины деформаций болтовой и сварной модели при нагружении по схеме №4

В случае одновременного нагружения радиальных элементов противоположно расположенных секторов металлоконструкции (схема нагружения №4) наибольшие перемещения наблюдаются в точке О (рис. 6, ж, з). В ходе моделирования деформированного состояния конечно-элементной модели металлоконструкции с болтовыми соединениями была получена следующая картина вертикальных перемещений контрольных точек: точки Н и F, лежащие на одной диагонали испытывают перемещения соответственно равные 0,657 мм и 0,611 мм; точки G и E, расположенные на перпендикулярной диагонали обладают меньшими перемещениями, достигающими 0,524 мм и 0,553 мм. В ходе проведения замеров на физической модели металлоконструкции с болтовыми соединениями были получены следующие значения перемещений: 1,02 мм и 0,94 мм у точек Н и E, принадлежавших более нагруженному сектору; 0,83 мм и 0,79 у точек G и F, расположенных в части тележки, испытывающей меньшую нагрузку. В случае металлоконструкции со сварными соединениями несущих элементов перемещения точек Н и E превышают перемещения точек G и F, что подтверждается и расчётными, и экспериментальными данными.

#### 4. Заключение

Анализ данных, полученных в ходе проведённого исследования позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Основываясь на расчётных и экспериментальных данных можно утверждать, что жёсткость металлоконструкций, сформированных на основе универсальных компоновочных схем, заметно увеличивается в случае использования сварных соединений. В среднем, вертикальные перемещения контрольных точек физической модели с болтовыми соединениями на 41% превышают перемещения, зарегистрированные в аналогичных точках сварной модели. В численном моделировании деформированного состояния металлоконструкций.

5. Сравнительный анализ результатов экспериментальных данных и компьютерно-

2. Тип соединений несущих элементов металлоконструкции влияет не только на её общую жёсткость, но и на взаимные перемещения точек отдельных элементов. Установлено, что в металлоконструкциях с разным типом использованных соединений и одинаковыми геометрическими параметрами при схожих схемах нагружения максимальные вертикальные перемещения могут наблюдаться в различных точках.

3. На жёсткость металлоконструкции непосредственное влияние оказывает конструктивное исполнение узлов соединений диагональных и хордовых элементов, что сказывается на величинах вертикальных перемещений точек, расположенных вблизи различных диагоналей. Следовательно, поиск конструктивных исполнений соединений несущих элементов, способствующих повышению жёсткости металлоконструкции, является важной задачей, решение которой необходимо найти в рамках дальнейших исследований.

4. Использование в ходе компьютерного моделирования конечно-элементной модели с болтовыми соединениями позволяет получать расчётные данные близкие по величине к реально наблюдаемым деформациям: минимальная разница расчётных и экспериментальных значений вертикальных перемещений составила 0,7%, средняя разница расчётных и экспериментальных значений вертикальных перемещений равна 19,4%. Однако в некоторых случаях разница данных, полученных в ходе экспериментальных исследований и компьютерного моделирования может достигать 41%. Это объясняется тем, что жёсткость болтовых соединений зависит от большого количества случайных факторов, таких как изменение усилия затяжки резьбовых соединительных элементов в течении срока службы металлоконструкции, допуски размеров отверстий, неравномерная коррозия деталей болтового соединения. Описанные факторы носят вероятностную природу, что осложняет их учёт при проектировании и го моделирования показывает, что физическая модель сварной металлоконструкции обладает заметно меньшей жёсткостью, чем конечно-элементная модель, использованная

для расчёта вертикальных перемещений контрольных точек. Так минимальная разница расчётных и экспериментальных значений вертикальных перемещений составила 27,7%, средняя разница расчётных и экспериментальных значений вертикальных перемещений равна 37,2%. Данное несоответствие объясняется тем, что применённая конечно-элементная модель недостаточно точно отражает пластические характеристики металлоконструкции в сварных швах и околошовной зоне. Отсюда вытекает необходимость разра-

ботки более совершенных конечно-элементных моделей сварных металлоконструкций с универсальной компоновочной схемой, позволяющих моделировать деформированного состояние с высокой точностью.

Представление данные и описанные закономерности необходимо учитывать при совершенствовании методик проектирования металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа на основе универсальных компоновочных схем и определении основных задач дальнейших исследований.

### Список литературы

1. Денисов И.А., Гончаров К.А. Проектирование металлоконструкций грузовых тележек мостовых кранов на основе универсальных компоновочных схем. Курск: ЗАО "Университетская книга", 2022. 185 с.
2. Денисов И.А. Обоснование параметров металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа на основании универсальной компоновочной схемы: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.04 / Денисов Илья Александрович. М., 2020. 198 с.
3. Гончаров К.А., Денисов И.А. Математические модели структурно-параметрического синтеза металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа на основе универсальных компоновочных схем // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 1. С. 26-34. DOI 10.22281/2413-9920-2019-05-01-26-34.
4. Гончаров К.А., Денисов И.А. Обоснование выбора расчётных схем элементов металлоконструкций грузовых тележек кранов мостового типа на основе универсальной компоновочной схемы // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. № 2. С. 155-163. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-155-163
5. Гончаров К.А., Денисов И.А. Подход к проектированию опорных тележек кранов общего назначения мостового типа с учётом универсальной компоновочной схемы их металлоконструкции // Вестник Брянского государственного технического уни-

### References

1. Denisov I.A., Goncharov K.A. *Proektirovanie metallokonstruktsiy gruzovykh telezhek mostovykh kranov na osnove universalnykh komponovochnykh skhem* [Design of metal structures for load trolleys of overhead cranes based on multipurpose layout drawing]. Kursk, University book, 2022. 185 p. (In Russian).
2. Denisov I.A. Substantiation of the parameters of metal structures of load trolleys of overhead cranes based on the multipurpose layout drawing. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Moscow. 2020. 198 p. (In Russian).
3. Goncharov K.A., Denisov I.A. Mathematical models of structural and parametric synthesis of load trolleys metalware of bridge cranes on basis of multipurpose layout drawings. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No. 1, pp. 26-34. doi: 10.22281/2413-9920-2019-05-01-26-34. (In Russian)
4. Goncharov K.A., Denisov I.A. Justification of calculation schemes choice for metalware segments of bridge crane trolleys based on multipurpose layout drawing configurations. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No. 2, pp. 155-163. doi: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-155-163. (In Russian)
5. Goncharov K.A., Denisov I.A. Approach to support truck design for general purpose cranes of bridge type taking into account universal layout diagram of their metal structure. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*,

- верситета. 2017. № 3(56). С. 43-49. DOI 10.12737/article\_59b11cbd491971.92745634.
6. Гончаров К.А., Денисов И.А. Универсальная компоновочная схема металлоконструкции грузовой тележки крана мостового типа // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2017. № 1. С. 60-66. DOI 10.22281/2413-9920-2017-03-01-60-66.
7. Денисов И.А., Кулешов Д.Ю. Особенности применения конечно-элементных моделей при исследовании напряжённо-деформированного состояния металлоконструкции грузовой тележки на основе универсальной компоновочной схемы // Инновационное развитие подъемно-транспортной техники: Материалы Всеросс. научно-практич. конф., Брянск, 01–02 октября 2020 года. Брянск: БГТУ, 2020. С. 21-25.
8. Лагереv И.А., Химич А.В., Шкурманова С.С. Подходы к имитационному моделированию рабочих процессов канатной лесозаготовительной машины для работы на склонах // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. № 2. С. 125-130. DOI 10.22281/2413-9920-2022-08-02-125-130.
9. 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. DOI 10.22281/2413-9920-2019-05-01-83-94.
10. Лагереv И.А., Химич А.В. Математическое моделирование динамики кабельной грузоподъемной машины // Ученые записки Брянского государственного университета. 2022. № 1(25). С. 7-10.
- 2017, No.3, pp. 43-49. doi: 10.12737/article\_59b11cbd491971.92745634. (In Russian).
6. Goncharov K.A., Denisov I.A. Multipurpose layout drawing of metalware of bridge crane load trolley. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2017, No.1, pp. 60-66. doi: 10.22281/2413-9920-2017-03-01-60-66. (In Russian).
7. Denisov I.A., Kuleshov D. Yu. Features of the application of finite element models in the study of the stress-strain state of the metal structure of a load trolley based on a multipurpose layout drawing. In: *Innovative development of lifting and transport equipment*, Bryansk, October 2020.
8. Lagerev I.A., Khimich A.V., Shkurmanova S.S. Approaches to simulation modeling of working processes of a rope logging machine for working on slopes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 125-130. doi: 10.22281/2413-9920-2022-08-02-125-130. (In Russian).
9. Lagerev I.A., Ostroukhov I.O., Khimich 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).
10. Lagerev I.A., Khimich A.V. Mathematical modeling of dynamics cable lifting machine. *Uchenye zapiski Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2022, No.1, pp. 7-10.

УДК (UDC) 69.002.5

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛОВ КОНТАКТНЫХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОСЪЕМНИКА  
ДЛЯ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ГРУНТОВTHE EFFECT OF THE THERMAL CONDUCTIVITY BY THE MATERIALS OF CON-  
TACT SURFACES ON THE HEAT BALANCE OF THE JET-GROUTING DRILL STEM  
HYDRAULIC ELEMENTSНовиков В.И.  
Novikov V.I.Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (Санкт-Петербург, Россия)  
Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (Saint-Petersburg, Russia)

**Аннотация.** В работе рассматриваются вопросы влияния теплопроводности и как следствие материалов контактных поверхностей бурового вала и уплотнительного элемента на изменение теплового баланса конструктивного узла «буровой став», используемого в технологии струйной цементации для закрепления слабых и неустойчивых видов грунтов. Показана модель с узлами для расчетной сетки сборочного узла «гидросъемник», частью которого являются рассматриваемые буровой вал и уплотнительные элементы. Рассчитаны методом конечных элементов в среде «Siemens Femap» значения температуры в зависимости от изменения коэффициентов теплопроводности контактирующих элементов. Расчеты проводились для четвертой части указанной модели, в силу осесимметричности решаемой задачи, что позволило в значительной степени сократить объем и время вычислений. Построены графики соответствующей зависимости для ряда точек, расположенных в характерных областях гидросъемника. Полученные данные аппроксимированы степенной регрессией, позволяющей вычислить значения температуры в указанных областях, рассматриваемого сборочного узла и провести экстраполяцию в дальнейшем, что позволит подбирать материал для бурового вала гидросъемника исходя из оптимального соотношения коэффициента теплопроводности вала, его коррозионной стойкостью, определяемых химическим составом стали и коэффициентом теплопроводности уплотнения.

**Ключевые слова:** струйная цементация, буровой став, уплотнительный элемент, моделирование, тепловой баланс, коэффициент теплопроводности.

**Дата принятия к публикации:** 03.02.2023  
**Дата публикации:** 25.03.2023

**Сведения об авторах:**

**Новиков Виталий Иванович** – кандидат технических наук, доцент, кафедра Судебных экспертиз, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государст-

**Abstract.** The paper is deals with the influence of thermal conductivity and the materials of the contact surfaces of the drill shaft and the sealing element on the change in the thermal balance of the structural unit "drilling string" used in the jet grouting technology to fix weak and unstable types of soils. A model with nodes for the computational grid of the "hydraulic puller" assembly unit is shown, part of which are the considered drill shaft and sealing elements. The temperature values are calculated by the finite element method in the «Siemens Femap's» environment depending on the change in the thermal conductivity coefficients of the contacting elements. Calculations were carried out for the fourth part of the indicated model, due to the axisymmetry of the problem being solved, this made it possible to significantly reduce the amount and time of calculations. Graphs of the corresponding dependence are constructed for a number of points located in the characteristic areas of the hydraulic stripper. Also, by power regression, expressions were obtained that allow calculating the temperature values in the indicated areas of the considered assembly. The obtained dependencies will make it possible in the future to select the material for the drill shaft of the hydraulic puller based on the optimal ratio of the thermal conductivity of the shaft, its corrosion resistance, determined by the chemical composition of the steel and the thermal conductivity of the sealing.

**Keywords:** jet grouting, drilling bar, sealing, modeling, heat balance, thermal conductivity.

**Date of acceptance for publication:** 03.02.2023  
**Date of publication:** 25.03.2023

**Author's information:**

**Novikov Vitaly Ivanovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Forensics at Saint-Petersburg State University of Architec-



венный архитектурно-строительный университет»,  
e-mail: vitalynewage@gmail.com.

ture and Civil Engineering,  
e-mail: vitalynewage@gmail.com.

## 1. Введение

В строительной отрасли из всех инъекционных технологий для закрепления слабых и неустойчивых грунтов в процессе строительства крайне востребована технология струйной цементации [1 - 3]. Суть данной технологии заключена в следующем – на месте производства строительных работ происходит наполнение полостей цементным раствором, который формирует грунтоцементные (или грунтобетонные) сваи диаметром 0,4...2,5 м, с параллельным созданием этих пустот за счет разрушения грунтов струями подаваемого цементного раствора. Для осуществления непосредственно инъекции цемента первоначально необходимо пробурить пилотную скважину диаметром 100...125 мм (т.е. имеет место малый диаметр бурения) на требуемую глубину, что реализуется обычно буровой установкой для струйной цементации и на обратном ходе происходит подъем бурового става (колонны), который продолжает вращаться, с подачей через него раствора под давлением 40...70 МПа. Частицы раствора попадают в грунт и перемешиваются с образованием грунтоцементной смеси. На данном этапе возможно размещение в не затвердевшей свае упрочняющего армирующего элемента. При затвердевании же формируется грунтобетонная колонна с прочностью на сжатие порядка 10 МПа, чьей вяжущей составляющей, как правило, является цемент стандартных марок. Таким образом, особенности строительного производства с использованием технологии струйной цементации позволяют обойтись без обсадной трубы и выполнить требуемый объем работ быстрее и эффективнее аналогичных технологий, что конечно отражается на степени востребованности технологии, выражаемой в различных областях применения струйной цементации. В первую очередь она идеальна для использования в условиях плотной городской застройки, т.к. не сопровождается ни динамическими воздействиями, ни вибрациями, а значит, отсутствуют воздействия

на соседние здания. Так же можно производить устройство или укрепление фундаментов зданий и сооружений и подпорных стенок, заглубление подвалов, укрепление стенок котлованов. Струйной цементацией организуют противодействия оползневым процессам, создают противодиффузионные завесы и осуществляют заполнение промышленных выработок или карстовых пустот. Применяется струйная цементация и для создания буровых инъекционных свай при строительстве новых зданий, сооружений или каких-либо объектов, коррекции плотности грунтов в процессе проектирования фундаментов и формировании разьединительных стенок для исключения деформаций. Отдельно стоит упомянуть такой момент, как небольшие габариты оборудования, а значит, есть возможность проводить работы в стесненных условиях (при высоте рабочей зоны от 1,8 м и ширине – 1,5 м) и активно использовать технологию для закрепления грунтов при проходке тоннелей, например, в метростроении. Но использование струйной цементации не ограничивается только выше перечисленными областями, но последнее время находит и довольно нестандартное применение [4].

На сегодняшний день основными производителями и поставщиками оборудования являются компании таких стран как Германия и Италия, установки для горизонтального бурения производятся так же и в КНР, поэтому проектирование различного рода устройств и оборудования, функционирующих в рамках этой технологии являются актуальными и востребованными [5, 6]. Основными составляющими классической конструктивной цепочки являются источник высокого давления, средства передачи высоконапорной струи водно-цементного раствора, технологический инструмент. Опыт эксплуатации показал, что наиболее уязвимым местом являются средства передачи высоконапорной струи цементного раствора и в частности «гидросъемник», чье функциональное назначение состоит в том, чтобы соединить вра-

щающийся инструмент (гидромонитор) с не вращающейся магистралью высокого давления с [7]. Отсюда возникающее в процессе эксплуатации по контактными поверхностям этого устройства значительное тепловыделение, приводящее к поломкам, т.е. к выходу его из строя. Таким образом, именно тепловой баланс в процессе работы гидросъемника определяет эксплуатационные характеристики всей цепочки.

## 2. Постановка задачи

Основываясь на ранее разработанных методиках и проведенном моделировании распределения теплового поля, а также полученных значений распределения температуры в рассматриваемом узле [6, 8 - 10], необходимо отметить, что наибольшее количество тепла скапливается со стороны одного из уплотнительных элементов, где отсутствует центральное отверстие и очевидно, что условия эксплуатации для этого элемента будут хуже, чем того, который находится под влиянием охлаждающего воздействия, проходящей по центральному отверстию, водно-цементной смеси. При таком распределении теплового поля немаловажную роль в образовании теплового баланса будет играть величина теплопроводности элементов гидросъемника, т.е. материалы из которых изготовлены детали с контактирующими поверхностями. Таким образом, актуальным будет являться моделирование распределения значений температуры при изменении значений коэффициентов теплопроводности, как бурового вала, так и уплотняющего элемента.

## 3. Разработанные модели

Для решения необходимой задачи существует ряд современных системы автоматизированного проектирования, с помощью которых можно моделировать физико-механические нагрузки, в чьей основе заложен метод конечных элементов, т.е. численные решения дифференциальных уравнений в частных производных или интегральных уравнений. Каждая такая система направлена решение конкретных задач на достаточно

точном уровне и позволяет определить влияние интересующих факторов на моделируемую систему. Поскольку создание геометрии составляет значительную часть времени по сравнению с подготовкой, разбиением конечно-элементной сетки и непосредственно самим расчетом, то вычислительная часть моделирования (рассматриваемая 3D-модель представлена на рис. 1) конструктивного узла «гидросъемник» реализована в программной среде «Siemens Femap». Данное программное обеспечение способно эффективно работать с данными полученными из САД-систем и что является очень удобным программным функционалом, имеющиеся многочисленные инструменты позволяют найти и удалить потенциально проблему с геометрией, т.е., например, просто убрать нежелательные детали.

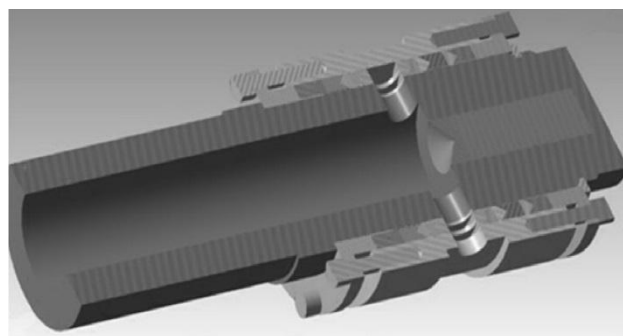


Рис. 1. 3D-модель гидросъемника в сечении

Кроме перечисленного, «Femap» предоставляет ряд возможностей по сеточному разбиению, такие как интерактивная подготовка и коррекция геометрии для разбиения, включая расщепление поверхностей и их смещение в сочетании с редкой функцией сшивания твердых тел при подготовке модели и ручным подавлением особенностей геометрии. С применением некоторых из этих функций построена конечно-элементная модель. Элементы были заданы в форме тетраэдра и куба, а в местах сопряжения поверхностей различных деталей, входящих в конструктивный узел, разбиение производилось вручную в виде куба для более правильного описания теплопередачи между расчетными элементами со сгущением по области уплотнительных элементов. Конечно-элементная

сетка (рис. 2) содержит около 1,53 миллиона элементов (на четвертую часть гидросъемника).

В состав гидросъемника входят вращающийся буровой вал ( $\varnothing 155$  мм) с внутренним глухим отверстием; отверстия ( $\varnothing 20$  мм), че-

рез которые проводится подача водно-цементной смеси во внутреннюю полость и неподвижных корпуса; два пакета уплотнительных элементов, расположенных симметрично относительно отверстия и соответственно двух крышек с зажимающими элементами.

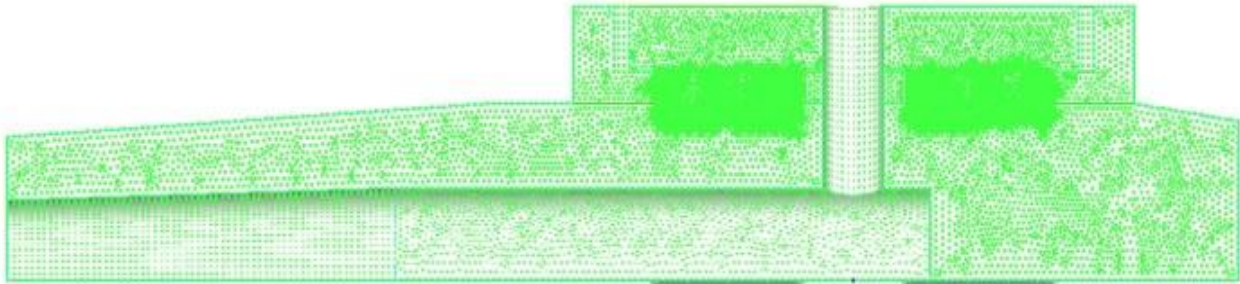


Рис. 2. Узлы расчетной сетки

В качестве материалов, заданы физико-механические характеристики: металлические части соответствуют коррозионно-стойкой стали аустенитного класса, для уплотнительных элементов – полимера «капрон» (ПА-6). Термическая нагрузка задавалась в местах контакта уплотнительных элементов и вала, исходя из известной тепловой мощности [8], выделяющейся при давлении  $P$  рабочей жидкости (водно-цементной смеси) в 60 МПа. Значения коэффициентов теплопроводности рассматривались в диапазонах 15,5...16,5 для стали  $k_{ст}$  и 0,24...0,3 для капрона  $k_{уп}$ . Также был задан ряд других параметров, необходимых для проведения расчета, таких как частота вращения вала  $n$ , которая составила 10 об/мин и соответствующая ей линейная скорость перемещения точек вала относительно неподвижных точек уплотнительных элементов равная 0,08 м/с и коэффициент трения между ними  $k=0,1$ . Хотя такая величина коэффициент трения и соответствует наиболее благоприятной схеме контакта поверхностей и даже скорее описывает несколько идеализированное взаимодействие стали и капрона, в связи с тем, что несмотря на наличие жидкости, речь идет не о воде, а о смеси с частицами цемента в своем составе. Однако применение минимального значения коэффициент трения является возможным, так как он влияет лишь на величину выделяющейся те-

пловой мощности [8], к тому же стали аустенитного класса обладают довольно низким коэффициентом теплопроводности относительно сталей других классов, поэтому в данном случае высокое тепловыделение будет излишним и более целесообразно применять именно выше указанное значение коэффициента трения.

#### 4. Результаты и их анализ

Поскольку задача является осесимметричной, то для сокращения общей трудоемкости и времени расчета рассматривалась четвертая часть конструкции. Получена общая картина теплового поля (рис. 3), формирующегося в гидросъемнике в процессе эксплуатации при выше указанных технологических параметрах, которая хорошо согласуется по характеру распределения теплового поля и по количественному значению распределения значений температуры, как с предварительно проведенными расчетами [8, 10], так и с моделью, созданной и рассчитанной в программной среде «Ansys» [6].

Кроме того выполненный расчет, позволяет провести аппроксимацию имеющихся данных и получить математическую зависимость значения температуры от значения коэффициентов теплопроводности вала и уплотнительного элемента.

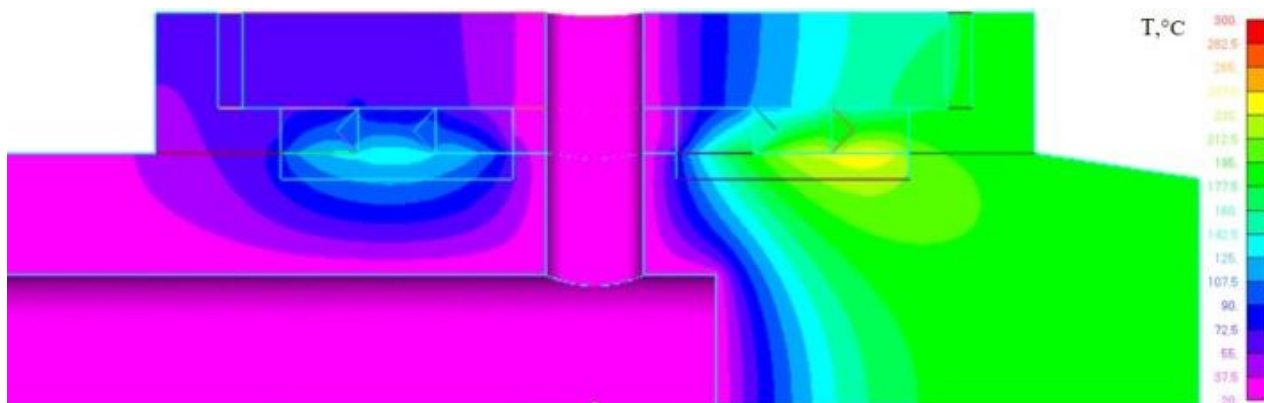


Рис. 3. Тепловое поле в гидросъемнике при  $P=60$  МПа,  $n=10$  об/мин,  $k=0,1$

Исходя из того, что невозможно рассматривать каждую точку теплового поля в гидросъемнике, то рационально остановиться на некоторых характерных точках, изменение температуры (или наличие постоянного значения оной) в которых было бы наиболее информативным с точки зрения описания теплового баланса устройства. Для чего были выбраны семь точек, в которых определялось численное значение для температуры (рис. 4): четыре точки – справа и слева относительно входного отверстия для подачи водно-цементной смеси в местах контакта вала и уплотнительных элементов соответственно (т. 1, т. 2, т. 4, т. 5) как области наиболее термически нагруженные; две точки – справа и слева от отверстия для водно-цементной смеси в периферийной области (т. 3, т. 6) как области доступные для наружного контроля; одна точка в месте аккумуляции выделяющегося тепла (т. 7).

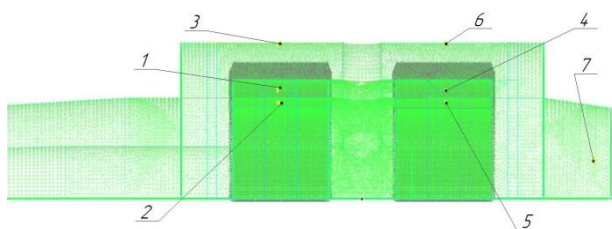


Рис. 4. Расчетные точки значений температуры в гидросъемнике

Аппроксимация множественной степенной регрессией позволяет наглядно представить влияние коэффициентов теплопроводности на температуру, что и продемонстрировано на графиках серией плоскостей (рис. 5).

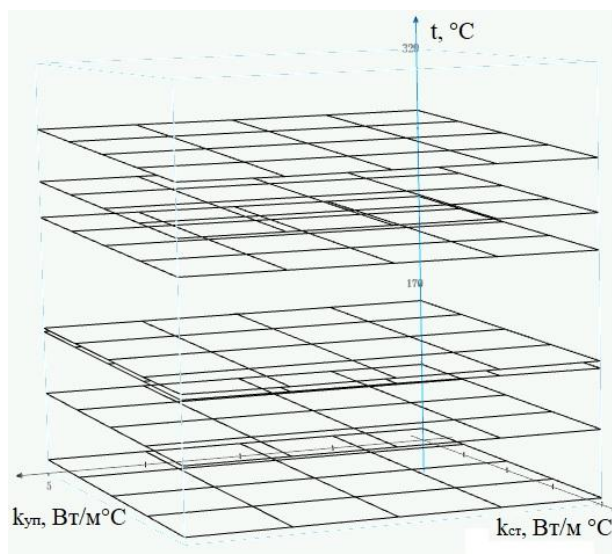


Рис. 5. Графики зависимости температуры от изменения коэффициентов теплопроводности вала и уплотнительного элемента для точек (сверху вниз): т.5, т.7, т.4, т.2, т.6, т.1, т.3

Изменение коэффициента теплопроводности уплотнительного элемента не оказывает практически никакого влияния на изменение значения температуры для всех рассматриваемых точек гидросъемника, что видимо связано со значительной разницей в теплопроводности стали и капролона и большая часть, выделяемой в процессе работы устройства, тепловой энергии идет именно в металлический вал и аккумулируется с противоположной течению водно-цементной смеси стороны, т.к. данная часть гидросъемника не охлаждается, проходящей внутри жидкостью, а конвекционный теплообмен с окружающим воздухом слишком незначителен и не может нивелировать поступление постоянно образующейся тепловой энергии, что и создает для «правого» уплотнительного эле-

мента крайне неблагоприятные условия эксплуатации.

Рассматривая влияние коэффициента теплопроводности стального вала, следует отметить, что с ростом теплопроводности происходит уменьшение значения температуры в рассматриваемых точках, что очевидно связано с режимом охлаждения гидросъемника водно-цементной смесью способствующей перераспределению тепла в сторону центрального отверстия. Вследствие низкой теплопроводности уплотнительного элемента тепловой поток в данном направлении будет меньше того, что переходит в стальной вал и затем либо переходит в рабочую жидкость, либо идет на увеличение температуры в «правой части» (рис. 3) устройства.

Особенно заметно различие степени влияния коэффициентов теплопроводности в экстраполированных данных. При увеличении теплопроводности вала до значения  $35 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$  заметно явное снижение температуры (рис. 6), причем ее значение, что немаловажно, будет находиться в области рабочих температур уплотнительного элемента (до  $+160^\circ\text{C}$  по ТУ 2224-003-39046337-2018, ТУ 2224-001-39046337-2018).

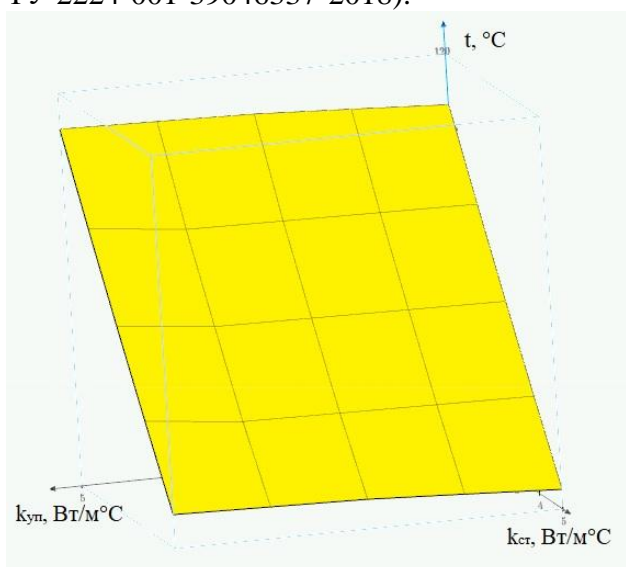


Рис. 6. График зависимости температуры от изменения коэффициентов теплопроводности вала и уплотнительного элемента в 1-й точке

Однако такая теплопроводность характерна для низкоуглеродистых и низколегированных сталей, применение которых для гидросъемника может быть не совсем обос-

нованным. Поскольку находящаяся во внутренней полости устройства рабочая жидкость находится под довольно высоким давлением (около  $40...70 \text{ МПа}$ , а, вероятно, и с возможностью увеличения давления до  $100 \text{ МПа}$ ), то использование выше указанной группы материалов с невысоким пределом текучести для изготовления деталей этого конструктивного узла может быть сопряжено с риском возникновения недопустимых деформаций, чье появление просто исключительно по причине возникновения в таком случае аварийной ситуации, а значит необходимо будет уменьшить величину рабочего давления, что в свою очередь приводит к уменьшению диаметра, получаемых грунтобетонных свай, вследствие недостаточного уровня кинетической энергии струй подаваемого в грунт цементного раствора, увеличению соответственно материалов и трудозатрат и в целом падению эффективности производства строительных работ. Также обладая не высокой коррозионной стойкостью, применение низкоуглеродистых и низколегированных сталей здесь будет влиять на эксплуатационный ресурс вала в сторону его (ресурса) снижения, что так же не является положительным моментом. Опираясь на выше изложенное, можно сделать вывод о рациональном применении в качестве материала для металлических деталей гидросъемника прежде всего легированных сталей с достаточной коррозионной стойкостью ферритного класса, коэффициент теплопроводности которых порядка  $25-28 \text{ Вт/м}^\circ\text{C}$  и обладающие достаточными прочностными характеристиками в сочетании с высокой обрабатываемостью.

## 5. Заключение

Получены методом конечных элементов в среде «Siemens Femap» значения температуры в зависимости от изменения коэффициентов теплопроводности контактирующих элементов гидросъемника, на основе которых построены графики соответствующей зависимости для ряда точек, расположенных в характерных областях конструкции. Полученные данные аппроксимированы степен-

ной регрессией и проведена экстраполяция, что в дальнейшем позволяет вычислить значения температуры в указанных областях, рассматриваемого сборочного узла и позволит подбирать материал для бурового вала гидросъемника исходя из оптимального соотношения коэффициента теплопроводности

вала, его коррозионной стойкостью, определяемых химическим составом стали и соответствующего коэффициента теплопроводности уплотнительного элемента.

### Список литературы

1. Merlini D., Stocker D., Falanesca M., Schuerch R. The Ceneri Base Tunnel: Construction Experience with the Southern Portion of the Flat Railway Line Crossing the Swiss Alps // *Engineering*. 2018. Vol.4. P. 235. DOI: 10.1016/j.eng.2017.09.004
2. Toraldo C., Modoni G., Croce P. Reliable definition of the characteristic strength of jet grouted soils by Random Field Theory // *Procedia Engineering*. 2016. Vol.158. P. 416. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.465
3. Wang Z.-F., Shen Sh.-L., Modoni G. Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: Theoretical model and application // *Computers and Geotechnics*. 2019. Vol. 111. P. 222. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.012
4. Veropalumbo R., Russo F., Viscione N., Biancardo S.A. Rheological Properties Comparing Hot and Cold Bituminous Mastics Containing Jet Grouting Waste // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. P. 8078527. DOI: 10.1155/2020/8078527
5. Yuan Y., Shen S.L., Wang Z.F., Wu H.N. Automatic Pressure-Control Equipment for Horizontal Jet-grouting // *Autom. Constr.* 2016. Vol. 69. P. 11.
6. Шевелев А.М., Ульянов А.А., Борышнев А.М., Новиков В.И. Моделирование распределения теплового поля в элементах гидросъемника для струйной цементации грунтов // Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых «Инновационные идеи в машиностроении» СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2022. С. 236-239.
7. Гарипов М.В., Головин К.А. Разработка конструкции расширителя прокалывающей установки для закрепления неустойчивых горных пород // *Известия Туль-*

### References

1. Merlini D., Stocker D., Falanesca M., Schuerch R. The Ceneri Base Tunnel: Construction Experience with the Southern Portion of the Flat Railway Line Crossing the Swiss Alps. *Engineering*, 2018, Vol.4, p. 235. DOI: 10.1016/j.eng.2017.09.004
2. Toraldo C., Modoni G., Croce P. Reliable definition of the characteristic strength of jet grouted soils by Random Field Theory. *Procedia Engineering*, 2016, Vol.158, p. 416. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.465
3. Wang Z.-F., Shen Sh.-L., Modoni G. Enhancing discharge of spoil to mitigate disturbance induced by horizontal jet grouting in clayey soil: Theoretical model and application. *Computers and Geotechnics*, 2019, Vol.111, p. 222. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.03.012
4. Veropalumbo R., Russo F., Viscione N., Biancardo S.A. Rheological Properties Comparing Hot and Cold Bituminous Mastics Containing Jet Grouting Waste. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 8078527. DOI: 10.1155/2020/8078527
5. Yuan Y., Shen S.L., Wang Z.F., Wu H.N. Automatic Pressure-Control Equipment for Horizontal Jet-grouting. *Autom. Constr.*, 2016, Vol. 69, p. 11. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.05.025
6. Shevelev A.M., Ulyanov A.A., Borishnev A.M., Novikov V.I. Modelirovanie raspredeleniya teplovogo polya v elementah gydros'emnika dlya struinoi tsementatsii gruntov. *Innovacionnie idei v mashinostroenii. Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*, SPb, POLITECH-PRESS, 2022, pp. 236-239.
7. Golovin K.A. Development of the design of the extender piercing installation for fixing unstable rocks. *Izvestiya Tulsogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheski*

ского государственного университета. Технические науки. 2013. № 1. С. 326-329.

8. Новиков В.И., Пушкарев А.Е., Манвелова Н.Е. Моделирование теплового баланса в процессе эксплуатации элементов гидросъемника бурового става для струйной цементации грунтов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2020. № 3. С. 404. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-06-03-404-410

9. Новиков В.И., Пушкарев А.Е., Щербачев А.П., Кузьмин О.В. Особенности расчета теплового баланса гидросъемника с учетом влияния на шероховатость поверхности электролитно-плазменного полирования // Металлообработка: научно-производственный журнал. 2020. № 4. С. 16. DOI: 10.25960/mo.2020.4.16

10. Новиков В.И. Влияние морфологии контактных поверхностей на распределение температурного поля в устройствах для струйной цементации грунтов // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2022. № 4. С. 54-62.

DOI: 10.31857/S0235711922020109

† nauki, 2013, No. 1, pp. 326-329. (In Russian).

† 8. Novikov V.I., Pushkarev A.E., Manvelova N.E. The modeling of the heat balance during operation of the drill stem hydraulic elements for inject soil cement. *Nauchno-tekhnicheskii Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, 2020, No. 3. (In Russian).

† 9. Novikov V.I., Pushkarev A.E., Scherbakov A.P., Kuzmin O.V. The influence of changes the surface roughness by electrolytic plasma polishing to the heat balance of the jet-grouting hydraulic puller. *Metalloobrabotka*, 2020, No. 4(118), pp. 16-23. (In Russian).

† 10. Novikov V.I. The Effect of the Morphology of Contact Surfaces on the Temperature Field Distribution in Devices for Jet-Grouting of Soils. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2022, No. 51(4), pp. 329-335.

† DOI: 10.3103/s1052618822020108.

УДК (UDC) 614.8: [377+625.1/.5+004.032.26]

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНЫХ АВАРИЙ КАНАТНЫХ ДОРОГ ПО КОМПЕТЕНЦИЯМ РАБОТНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

## ASSESSMENT OF POSSIBLE CABLE CAR ACCIDENTS BY EMPLOYEE COMPETENCIES USING NEURAL NETWORKS

Панфилов А.В., Николаев Н.Н., Хван Р.В., Короткий А.А.  
Panfilov A.V., Nikolaev N.N., Khvan R.V., Korotkiy A.A.Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, РФ)  
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

**Аннотация.** Канатный транспорт получил достаточно большое развитие в области пассажирских и грузовых перевозок. В ряде случаев (например, на горнолыжных курортах) он является незаменимым. Для предотвращения нестандартных ситуаций разработано достаточно большое количество нормативов и правил безопасной эксплуатации и технического обслуживания. Однако аварийные ситуации все-таки возникают. Одной из причин является недостаточная профессиональная подготовка работников канатного транспорта, которые должны знать и владеть навыками применения положений нормативной документации, а также правильно исполнять свои профессиональные обязанности. Данная статья посвящена научной проблеме вероятностной оценки возможности возникновения различных аварийных ситуаций на канатном транспорте в зависимости от уровня овладения профессиональными компетенциями и составляющими их знаниями, умениями и навыками. Для решения данной задачи применена технология на основе обучения нейронных сетей. В качестве примера рассмотрены специалисты по профессиональному стандарту «Специалист по организации безопасной эксплуатации пассажирских канатных дорог и фуникулеров».

**Ключевые слова:** авария, нестандартная ситуация, канатная дорога, вероятность, оценка, компетенция, человеческий фактор, нейронная сеть

**Дата принятия к публикации:** 07.03.2023  
**Дата публикации:** 25.03.2023

**Сведения об авторах:**

**Панфилов Алексей Викторович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета, e-mail: panfilov@ikcmvsl.ru  
ORCID: 0000-0001-7211-1824

**Николаев Николай Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета, e-mail: nneks@yandex.ru.  
ORCID: 0000-0003-2087-0233

**Abstract.** Rope transport has received quite a lot of development in the field of passenger and cargo transportation. In some cases (for example, in ski resorts), it is indispensable. To prevent emergency situations, a sufficiently large number of standards and rules for safe operation and maintenance have been developed. However, emergencies do occur. One of the reasons is the insufficient professional training of rope transport workers, who must know and possess the skills to apply the provisions of regulatory documentation, as well as properly perform their professional duties. This article is devoted to the scientific problem of probabilistic assessment of the possibility of various emergency situations on cable transport, depending on the level of mastery of professional competencies and their constituent knowledge, skills and abilities. To solve this problem, a technology based on neural network training has been applied. As an example, specialists in the professional standard "Specialist in the organization of safe operation of passenger cable cars and funiculars" are considered.

**Keywords:** accident, emergency, cable car, probability, assessment, competence, human factor, neural network

**Date of acceptance for publication:** 07.03.2023  
**Date of publication:** 25.03.2023

**Authors' information:**

**Alexey V. Panfilov** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University, e-mail: panfilov@ikcmvsl.ru  
ORCID: 0000-0001-7211-1824

**Nikolai N. Nikolaev** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University, e-mail: nneks@yandex.ru.  
ORCID: 0000-0003-2087-0233



**Хван Роман Владимирович** – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета, *e-mail: khvanroman@yandex.ru.*

ORCID: 0000-0002-1246-4262

**Короткий Анатолий Аркадьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета, *e-mail: korot@novoch.ru.*

ORCID: 0000-0001-9446-4911

**Roman V. Khvan** – Candidate of Technical Sciences, Assistant at the Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University, *e-mail: khvanroman@yandex.ru.*

ORCID: 0000-0002-1246-4262

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

ORCID: 0000-0001-9446-4911

## 1. Введение

Канатный транспорт успешно применяется в сфере грузовых и пассажирских перевозок. Он обладает множеством преимуществ перед другими видами транспорта: высокие провозные возможности, относительно низкая стоимость оборудования и инфраструктуры, высокая скорость строительства новых канатных дорог, низкий уровень аварийности и другие. Канатные дороги и фуникулеры являются незаменимыми в горных условиях и при больших перепадах высот в условиях городов. На основе канатного транспорта в ряде городов мира применяется канатное метро. Для успешного и безаварийного функционирования канатного транспорта разработаны нормативные документы [1-4], регламентирующие требования по его безопасной эксплуатации, нормативы проведения технического обслуживания и освидетельствования, профессиональные обязанности работников канатного транспорта.

Данные нормативные документы служат основой обучения и аттестации работников канатного транспорта на базе современного компетентностного подхода.

Однако аварийные ситуации все же возникают. Одной из главных причин нештатных ситуаций является человеческий фактор [5]. Следовательно, имеется недостаточное освоение работниками канатного транспорта профессиональных компетенций, которое оказывает влияние на факторы возникновения аварийных ситуаций.

Отсюда можно сформулировать научную проблему: оценка вероятности возникновения аварийных ситуаций через оценку степени владения профессиональными компетенциями работников.

## 2. Постановка задачи

В соответствии с указом Президента РФ и «Национальной стратегией...» [6] предлагается внедрить технологии искусственного интеллекта на базе нейронных сетей для оценки остаточных знаний при проведении аттестации персонала, в центрах оценки квалификаций и в прочих случаях.

Идея состоит в том, что при компетентностном подходе используют такие понятия как знания, умения и навыки. Проверка знаний состоит в ответе на сформулированные вопросы по каждому из разделов. Причем проверка знаний состоит из ответов на вопросы – «теоретические знания» и проверке умений и навыков, путем выполнения каких-либо практических тестов (решение тематических задач, чтение чертежей, выполнение конкретных практических работ в центрах оценки квалификаций) [7].

Из статистических данных, опубликованных в открытой печати и из отчетов министерств и ведомств [8-10] известно, что примерно 61% аварий, инцидентов и несчастных случаев происходит по вине человеческого фактора. Известны как же причины, которые привели к конкретной аварии, инциденту и несчастному случаю, что подтверждено выводами в актах расследования.

Основными причинами аварийности и травматизма на подвесных канатных дорогах являются:

1. Технические причины (неисправность механического, электрооборудования, систем управления, устройств и приборов безопасности) – 39%, из которых около половины, связаны с выходом из строя стальных канатов;

2. Ошибочные действия персонала, низкий уровень профессиональных знаний нормативно-технической документации – 37%;

3. Влияние внешней среды и природных явлений – 24%

Экспертным путем можно установить связь между ответами на вопросы, практическими тестами при проведении аттестации с причинами, по которым произошли аварии, инциденты и несчастные случаи.

Основными значимыми опасными факторами являются:

1. Движущиеся машины и механизмы, части производственного оборудования, разрушающиеся конструкции.

2. Расположение на значительной высоте относительно поверхности элементы и оборудование, требующие обслуживания.

При оценке знаний, умений и навыков каждого аттестуемого по каждому виду проверок ставятся определенные баллы. При ответе на 80% аттестуемый считается допущенным к работе. Таким образом у нас получается матрица данных.

Статистические данные в матрице по результатам аттестации можно связать с причинами аварий (инцидентов и несчастных случаев).

### 3. Разработанные модели

Таким образом, можно обучить нейронную сеть и при аттестации очередного претендента можно с какой-то вероятностью говорить о его недостаточных знаниях, которые могут привести к прогнозируемой (предполагаемой) аварии. На рис. 1. представлена схема искусственной нейронной сети для установления причины аварии подвесной канатной дороги.

Схема предлагаемой нейронной сети, представленная на рис. 1 включает в себя входной слой, скрытые слои и выходной слой.

Входной слой состоит из нейронов, соответствующих необходимым компетенциям работника. В качестве примера реализации взяты компетенции специалистов по профессиональному стандарту «Специалист по организации безопасной эксплуатации пассажирских канатных дорог и фуникулеров»

[11]. Количество нейронов во входном слое может быть изменено в зависимости от количества необходимых компетенций для той или иной должности работника. Для указанного профессионального стандарта количество компетенций составляет 109 штук. Каждой компетенции присвоено буквенно-цифровое обозначение для удобства введения в нейронную сеть. В качестве примера некоторые из них приведены в табл. 1-3.

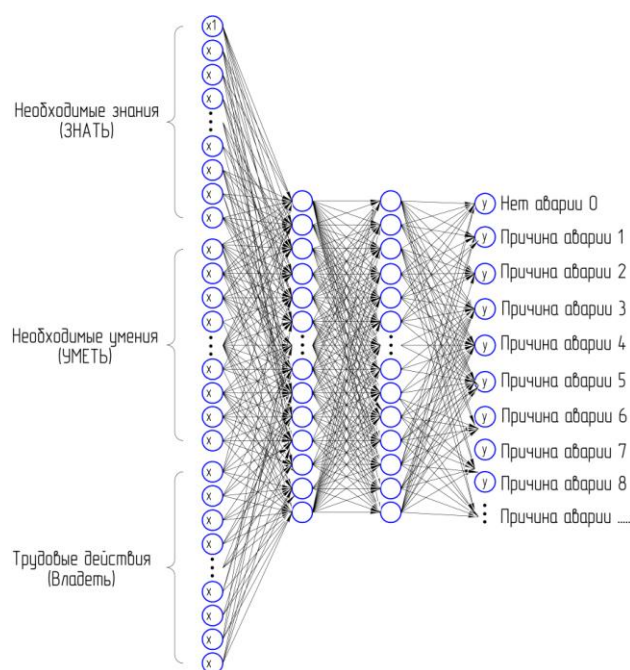


Рис. 1. Схема нейронной сети для установления причины аварии канатных дорог

Входной слой состоит из нейронов, соответствующих необходимым компетенциям работника. В качестве примера реализации взяты компетенции специалистов по профессиональному стандарту «Специалист по организации безопасной эксплуатации пассажирских канатных дорог и фуникулеров» [11]. Количество нейронов во входном слое может быть изменено в зависимости от количества необходимых компетенций для той или иной должности работника. Для указанного профессионального стандарта количество компетенций составляет 109 штук. Каждой компетенции присвоено буквенно-цифровое обозначение для удобства введения в нейронную сеть. В качестве примера некоторые из них приведены в табл. 1-3.

Таблица 1

## Необходимые знания (фрагмент)

Необходимые знания (ЗНАТЬ)	Условное обозначение
Законодательство Российской Федерации в области промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых эксплуатируются пассажирские канатные дороги и фуникулеры	C1
Нормативные правовые акты, устанавливающие порядок обслуживания опасных производственных объектов, на которых эксплуатируются пассажирские канатные дороги и фуникулеры	C2
Типовые правила пользования пассажирской подвесной канатной дорогой и фуникулером	C3
Устройство пассажирской канатной дороги и фуникулера и их элементов, требования руководства по эксплуатации	C4
Должностные и производственные инструкции персонала пассажирской канатной дороги и фуникулера	C5

Таблица 2

## Необходимые умения (фрагмент)

Необходимые умения (УМЕТЬ)	Условное обозначение
Организовывать собственную деятельность и деятельность подчиненного персонала в соответствии с требованиями руководства по эксплуатации пассажирской канатной дороги и фуникулера и правил безопасности пассажирских канатных дорог и фуникулеров	B1
Использовать в работе нормативно-техническую документацию по обеспечению безопасной эксплуатации пассажирских канатных дорог и фуникулеров	B2
Принимать решения при перевозке пассажиров и грузов на пассажирской канатной дороге и фуникулере и доводить их до персонала	B3

Статистика для входного слоя нейронной сети получена из ответов и выполненных заданий аттестуемого персонала, работниками в центрах оценки квалификаций при проведении аттестации по необходимым компетенциям для данного профессионального стандарта, а затем расширена путем генерации условных специалистов методом Монте-

Таблица 3

## Трудовые действия (фрагмент)

Трудовые действия (ВЛАДЕТЬ)	Условное обозначение
Выдача персоналу нормативно-технической документации по эксплуатации пассажирских канатных дорог и фуникулеров и ее своевременное обновление	A1
Разработка правил перевозки пассажиров и провоза ручной клади на пассажирской канатной дороге и фуникулере	A2
Согласование и утверждение правил перевозки пассажиров и провоза ручной клади на пассажирской канатной дороге и фуникулере в органах государственного (муниципального) управления	A3
Разработка плана спасательной операции для пассажирской канатной дороги и фуникулера	A4
Разработка должностных и производственных инструкций персонала, занятого эксплуатацией пассажирской канатной дороги и фуникулера	A5

Карло. Здесь решалась задача получения равномерных положительных и отрицательных оценок по всем компетенциям для обучения нейронной сети на всевозможных сочетаниях входных данных.

Методом Монте-Карло были сгенерированы данные по аттестации 200 условных специалистов и выставлены оценки по каждой компетенции: 0 – не сдал, 1 – сдал (при оценке выполнения задания более 80%). Оценки компетенций формируются на основе анализа решений задач и ответов на вопросы из экзаменационных билетов. В результате получена матрица компетенций (рис. 2).

Скрытые слои нейронной сети формируются в ходе обучения и выполняют функции преобразования и связи между нейронами входного и выходного слоя.

Выходной слой нейронной сети состоит из нейронов, соответствующих различным причинам аварий канатных дорог. При этом была использована статистика по авариям на канатных дорогах, полученная из различных источников, в том числе из публикаций Международной организации канатного транс-

ФИО аттестуемого	Трудовые действия					
	Выдача персоналу нормативно-технической документации по эксплуатации пассажирских канатных дорог и фуникулеров и ее своевременное обновление	Разработка правил перевозки пассажиров и провоза ручной клади на канатной дороге и фуникулере	Согласование и утверждение правил перевозки пассажиров и провоза ручной клади на канатной дороге и фуникулере в органах государственного (муниципального) управления	Разработка плана спасательной операции для пассажирской канатной дороги и фуникулера	Разработка должностных и производственных инструкций персонала, занятого эксплуатацией пассажирской канатной дороги и фуникулера	Контроль за соблюдением условий перевозок пассажиров и ручной клади на канатной дороге и фуникулере
Обозначение →	A1	A2	A3	A4	A5	A6
1	0	1	1	1	0	1
2	1	1	1	1	0	1
3	0	1	1	1	1	1
4	0	1	1	1	1	1
5	0	0	1	1	1	1

Рис. 2. Матрица компетенций (фрагмент)

порта (OITAF). Определение выходных данных при обучении нейронной сети – причин аварий при различных комбинациях компетенций работников было выполнено экспертным методом, т.е. подготовлены опросные листы для экспертов в данной предметной области, в которых предлагалось определить возможную аварию по комплексу оценок компетенций, необходимых для работы в соответствующей должности.

#### 4. Результаты и их анализ

В результате были сформулированы возможные инциденты на канатных дорогах и фуникулерах, а также сопоставлены влияющие компетенции (табл. 4).

В соответствие с сгенерированными значениями оценки освоенности компетенций рассчитаны вероятности свершения инцидентов по причине человеческого фактора (недостаточной обученности персонала) (рис. 3).

Инцидентам для удобства присвоены буквенно-цифровые обозначения.

Поскольку различные виды инцидентов не являются событиями несовместимыми (возникновение одних не исключает возникновение других), то сумма их вероятностей не равна 100%.

Было обучено 20 нейронных сетей типа MLP (многослойный перцептрон) и из них выбрано 5 лучших, дающих наилучшую производительность и минимальную ошибку (рис. 4).

На рис. 5 также видно, что все они достаточно хорошо обучены (их точки лежат вблизи наклонной линии).

Однако сеть номер 5 MLP 218-24-11 имеет сходимость 0,96 по тестовой выборке, что является наилучшим значением. Она имеет 218 нейронов во входном слое (поскольку на входе категориальная переменная 0 или 1 в количестве 109 компетенций), 24 нейрона в скрытом слое и 11 нейронов в выходном слое. Функция активации скрытого слоя – Identity (тождественная), а выходного слоя – Logistic (логистическая).

Таблица 4

Виды инцидентов и влияющие компетенции

Вид инцидента	Влияющая компетенция
Отказ оборудования и (или) травмирование пассажиров вследствие ненадлежащего провоза ручной клади	A2 A3 A6 A7 A8 B2 C3 G4 I4
Травмирование пассажиров вследствие нарушения правил их перевозки	A1 A2 A3 A6 A7 B3 B6 B9
Травмирование пассажиров при спасательных операциях и (или) ненадлежащая медицинская помощь	A4 B4 C9 D7 D8 D9 D10 O3 R5 R6
Травмирование пассажиров вследствие ненадлежащего информирования	A7 A8 A6 B5
Отказ оборудования и (или) травмирование пассажиров вследствие ошибочных действий персонала	A1 A5 B1 B2 B3 B8 C1 C2 C3 C4 C5 C7 D3 D4 D5 D6 D9 D10 E1 G2 G3 G4 G5 G6 H1 H3 H4 H5 H6 I3 P1 P2 P7 Q4 R8 H2 I5 K3 Q5
Травмирование пассажиров отдельных категорий, требующих сопровождения и (или) помощи	A7 A8 B6 R8
Травмирование пассажиров при входе и в выходе с канатной дороги (фуникулера) вследствие возникновения очередей	A7 A8 B4 B5 B7 B8 B9 P3 P4
Отказ оборудования и (или) травмирование людей при нарушениях проведения ТО и Р	C6 C7 C8 D1 D2 D3 D5 D6 E1 E2 E3 E4 E5 F4 F5 G1 G2 G3 J1 J2 J3 J4 J5 K4 K5 K6 O4 Q2 Q6 R1 R2 R3 R4 R5 K1 K2
Травмирование людей вследствие воздействия вредных производственных факторов	C7 C9 C10 F1 F3 R7

Отказ оборудования и (или) травмирование пассажиров вследствие ненадлежащего провоза ручной клади	Травмирование пассажиров вследствие нарушения правил их перевозки	Травмирование пассажиров при спасательных операциях и (или) ненадлежащая медицинская помощь	Травмирование пассажиров вследствие ненадлежащего информирования	Отказ оборудования и (или) травмирование пассажиров вследствие ошибочных действий персонала	Травмирование пассажиров отдельных категорий, требующих сопровождения и (или) помощи	Травмирование пассажиров при входе и в выходе с канатной дороги (фуникулера) вследствие возникновения очередей	Отказ оборудования и (или) травмирование людей при нарушениях проведения ТО и Р	Травмирование людей вследствие воздействия вредных производственных факторов	Травмирование людей вследствие нарушения правил охраны труда	Отказ оборудования и (или) травмирование пассажиров вследствие ненадлежащего технического освидетельствования и диагностирования
EMG1	EMG2	EMG3	EMG4	EMG5	EMG6	EMG7	EMG8	EMG9	EMG10	EMG11
11%	0%	11%	0%	19%	0%	11%	36%	17%	26%	40%
78%	71%	44%	100%	36%	50%	44%	33%	0%	11%	30%
44%	29%	33%	75%	22%	75%	33%	21%	33%	37%	50%
33%	29%	56%	25%	28%	0%	33%	33%	17%	37%	30%
11%	0%	22%	25%	22%	50%	22%	15%	33%	26%	20%
22%	29%	33%	75%	19%	50%	78%	21%	50%	26%	30%
22%	29%	11%	50%	33%	50%	56%	33%	17%	26%	30%
33%	57%	11%	50%	31%	25%	22%	24%	17%	32%	50%
44%	29%	11%	50%	17%	25%	33%	30%	17%	32%	0%
33%	57%	33%	25%	33%	75%	44%	12%	50%	26%	30%

Рис. 3. Вероятности возникновения инцидентов по причине человеческого фактора

Index	Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
1	MLP 218-12-11	0.993399	0.947157	0.955399	0.002379	0.019341	0.015090	BFGS 72	SOS	Identity	Logistic
2	MLP 218-11-11	0.992109	0.940778	0.950243	0.002897	0.020397	0.017288	BFGS 62	SOS	Identity	Logistic
3	MLP 218-20-11	0.994209	0.949481	0.952472	0.001741	0.014819	0.016005	BFGS 70	SOS	Identity	Tanh
4	MLP 218-18-11	0.994642	0.954333	0.958613	0.001998	0.017478	0.013841	BFGS 61	SOS	Identity	Logistic
5	MLP 218-24-11	0.995462	0.957706	0.962244	0.001719	0.016743	0.013223	BFGS 59	SOS	Identity	Logistic

Рис. 4. Пять лучших нейронных сетей

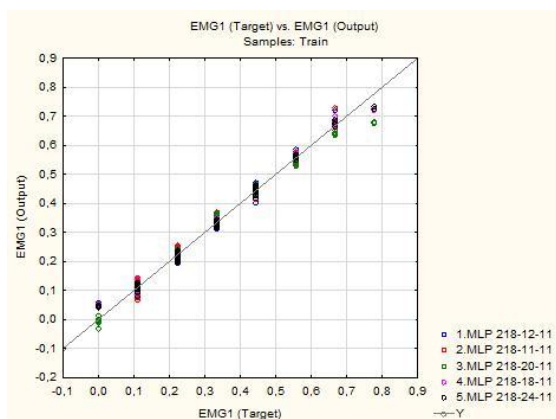


Рис. 5. Графическое представление обученности нейронных сетей

## 5. Заключение

Таким образом, использование нейронных сетей позволит определять возможные

причины аварий ПКД, к которым может привести некомпетентность персонала в области эксплуатации, ремонта и технического обслуживания канатных дорог на стадии аттестации (экзаменации) и давать рекомендации руководителям организаций о назначении (или не назначении) того или иного человека на ту или иную должность. При этом такой подход дает возможность уменьшить аварийность на ПКД за счет точечного повышения квалификации сотрудников организаций, отвечающих за эксплуатацию, ремонт и техническое обслуживание канатных дорог с использованием искусственных нейронных сетей.

## Список литературы

1. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13 ноября 2020 года № 441 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности пассажирских канатных дорог и фуникулеров». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573191373?marker=6520IM>.

2. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13.04.2022. № 120. 13.04.2022 № 120 «О внесении изменений в федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности», утверждённые приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 октября 2020 г. № 420» (Зарегистрирован 06.06.2022 № 68752) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202206070009>.

3. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: федеральный закон № 116-ФЗ от 21.07.1997 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_173548/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173548/).

4. Об Основах государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу: Указ Президента РФ от 06.05.2018 N 198. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_297389/](http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_297389/).

5. Егельская Е.В., Короткий А.А. Оценка риска человеческого фактора в системе «персонал – подъемные механизмы – производственная среда» на предприятиях машиностроения // Вестник Донского государственного технического университета. 2015 15(1) С. 131-137. DOI: [doi.org/10.12737/10396](https://doi.org/10.12737/10396).

6. Указ Президента РФ от 10.10.2019 №

## References

1. Order No. 441 of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated November 13, 2020 «On Approval of Federal Norms and Rules in the Field of industrial safety «Safety Rules for Passenger Cable Cars and Funiculars». [Electronic resource] – Access mode: <https://docs.cntd.ru/document/573191373?marker=6520IM>.

2. Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated 13.04.2022. No. 120. 13.04.2022 No. 120 «On Amendments to Federal Norms and Rules in the Field of Industrial Safety «Rules for Industrial Safety Expertise», approved by Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision dated October 20, 2020 No. 420» (Registered 06.06.2022 No. 68752) [Electronic resource] – Access mode: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202206070009>.

3. On industrial safety of hazardous production facilities: Federal Law No. 116-FZ of 21.07.1997 [Electronic resource]. Access mode: [www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_173548/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173548/).

4. On the Fundamentals of the State policy of the Russian Federation in the field of industrial safety for the period up to 2025 and beyond: Decree of the President of the Russian Federation dated 06.05.2018 N 198. [Electronic resource]. Access mode: [http://consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_297389/](http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_297389/).

5. Egelskaya E.V., Korotkiy A.A. Risk assessment of the human factor in the system «personnel – lifting mechanisms – production environment» at machine-building enterprises. *Bulletin of the Don State Technical University*, 2015, No. 15(1), pp. 131-137. DOI: [doi.org/10.12737/10396](https://doi.org/10.12737/10396).

6. Decree of the President of the Russian Federation No. 490 dated 10.10.2019 «On the development of artificial intelligence in the Russian Federation» (together with the «National Strategy for the Development of Artificial Intelligence for the period up to 2030»). [Electronic resource]. Access mode:

490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» (вместе с «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года»). [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/44731>

7. Короткий А.А., Иванов Б.Ф., Панфилов А.В., Егельская Е.В. О подготовке кадров для пассажирских канатных дорог // Передовые инженерные исследования. 2014. №3(78). DOI: [doi.org/10.12737/5707](https://doi.org/10.12737/5707).

8. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2021 году [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_report](https://www.gosnadzor.ru/public/annual_report)

9. ОИТАФ – Международная организация канатных перевозок [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.oitaf.org/>.

10. Кинжибалов А.В. Повышение безопасности пассажирских канатных дорог на основе оценки риска и резервирования привода: Дисс. ... канд. техн. наук. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2008. 174 с.

11. Министерство труда и социальной защиты РФ. Приказ от 8 февраля 2021 года № 45н «Об утверждении профессионального стандарта «Специалист по организации безопасной эксплуатации пассажирских канатных дорог и фуникулеров» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rg.ru/documents/2021/04/30/mintrud-prikaz45-site-dok.html>.

<http://www.kremlin.ru/acts/bank/44731>.

7. Korotkiy A.A., Ivanov B.F., Panfilov A.V., Egelskaya E.V. On personnel training for passenger cable cars. *Advanced Engineering Research*, 2014, No. 3(78). DOI: [doi.org/10.12737/5707](https://doi.org/10.12737/5707).

8. Report on the activities of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision in 2021 [Electronic resource]. Access mode: [https://www.gosnadzor.ru/public/annual\\_report](https://www.gosnadzor.ru/public/annual_report)

9. OITAF – International Organization of Rope Transportation [Electronic resource]. Access mode: <https://www.oitaf.org/>.

10. Kinzhibalov A.V. Improving the safety of passenger cable cars based on risk assessment and drive redundancy: Diss. ... candidate of tech. sc. Novocherkassk: YuRSTU (NPI), 2008. 174 p.

11. Ministry of Labor and Social Protection of the Russian Federation. Order No. 45n dated February 8, 2021 «On approval of the professional standard «Specialist in the organization of safe operation of passenger cable cars and funiculars» [Electronic resource]. Access mode: <https://rg.ru/documents/2021/04/30/mintrud-prikaz45-site-dok.html>.

УДК (UDC) 629.1.05

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ ЗАДАЧИ ВИДЕОСКОПИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ  
СОСТОЯНИЯ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВALGORITHMIZATION OF THE PROBLEM OF VIDEOSCOPIIC EVALUATION OF THE  
STEEL ROPES STATEПанфилов А.В.<sup>1</sup>, Юсупов А.Р.<sup>1</sup>, Гавриков М.М.<sup>2</sup>, Синецкий Р.М.<sup>2</sup>  
Panfilov A.V.<sup>1</sup>, Yusupov A.R.<sup>1</sup>, Gavrikov M.M.<sup>2</sup>, Sinetsky R.M.<sup>2</sup><sup>1</sup> – Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Россия)<sup>2</sup> – Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
имени М.И. Платова (Новочеркасск, Россия)<sup>1</sup> – Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)<sup>2</sup> – South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Platov (Novocherkassk, Russian Federation)

**Аннотация.** В работе рассмотрена задача автоматизации контроля технического состояния стальных канатов, которые являются элементами многих промышленных и гражданских установок и машин, таких как лифты, канатные дороги, подъемники и т.д. На сегодняшний день оценка состояния стальных канатов и безопасности их эксплуатации выполняется преимущественно посредством визуального и инструментального контроля, занимающего много времени и подверженного влиянию человеческого фактора, что обуславливает актуальность задачи автоматизации данного процесса с использованием средств вычислительной техники и методов искусственного интеллекта. В статье предложены два подхода к алгоритмизации задачи видеоскопического контроля состояния стальных канатов с использованием технологий компьютерного зрения, основанных на программном моделировании логики визуального анализа и функции самообучения, с применением искусственных нейронных сетей глубокого обучения. Авторами разработаны алгоритмы автоматического обнаружения основных типов дефектов в изображениях поверхности стальных канатов: увеличение/уменьшение диаметра, деформации в виде волнистости, обрывов наружных проволок, повреждений в результате температурного воздействия или электрического дугового разряда. В работе приведены результаты предварительной апробации разработанных алгоритмов и программ, предложены состав и способы определения основных показателей для оценки их эффективности.

**Ключевые слова:** дефекты канатов, контроль инструментальный, компьютерное зрение, искусственные нейронные сети.

**Дата принятия к публикации:** 07.03.2023  
**Дата публикации:** 25.03.2023

**Сведения об авторах:**

**Панфилов Алексей Викторович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Экс-

**Abstract.** The paper considers the problem of monitoring the technical state of steel ropes used in industrial and civil installations, such as elevators, cable cars, lifts, etc. To date, the assessment of the state of steel ropes and the safety of their operation is carried out mainly through visual-instrumental control, which is long in time and subject to the influence of the human factor, which determines the relevance of the task of automating this process using computer technology and artificial intelligence methods in order to improve the quality of the assessment, reducing the check interval, detecting defects in steel ropes at an early stage. The article proposes two approaches to the algorithmizing of the problem of videoscopic control of the state of steel ropes using computer vision technologies, based on software modeling of the logic of visual analysis and machine learning methods, such as deep learning artificial neural networks. The authors have developed algorithms for automatic detection of the main types of defects in images of the surface of steel ropes: increase/decrease in diameter, deformation in the form of rope, breaks in the outer wires, thermal and electric damage. The paper presents the results of preliminary testing of the developed algorithms and programs, the composition and methods for determining the main indicators for evaluating their effectiveness are proposed.

**Keywords:** rope defects, instrumental control, computer vision, artificial neural networks.

**Date of acceptance for publication:** 07.03.2023  
**Date of publication:** 25.03.2023

**Authors' information:**

**Aleksey V. Panfilov** – Cand. Sci. (Eng.), associate professor, associate professor of the Operation of



плуатация транспортных систем и логистика» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», e-mail: [panfilov@ikcmysl.ru](mailto:panfilov@ikcmysl.ru).

ORCID: 0000-0001-7211-1824

**Юсупов Александр Рашидович** – старший преподаватель кафедры «Робототехника и мехатроника» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», e-mail: [temple\\_black@mail.ru](mailto:temple_black@mail.ru).

ORCID: 0000-0003-2179-616X

**Гавриков Михаил Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», e-mail: [gmm1000@yandex.ru](mailto:gmm1000@yandex.ru).

ORCID: 0000-0002-5286-0403

**Синецкий Роман Михайлович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечение вычислительной техники» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», e-mail: [rmsin@npi-tu.ru](mailto:rmsin@npi-tu.ru).

ORCID: 0000-0001-6810-6109

transport systems and logistics Department at Don State Technical University, e-mail: [panfilov@ikcmysl.ru](mailto:panfilov@ikcmysl.ru).

ORCID: 0000-0001-7211-1824

**Aleksandr R. Yusupov** – Senior Lecturer of the Department of Robotics and Mechatronics at the Don State Technical University, e-mail: [temple\\_black@mail.ru](mailto:temple_black@mail.ru).

ORCID: 0000-0003-2179-616X

**Mikhail M. Gavrikov** – Cand. Sci. (Eng.), associate professor, associate professor of the Software Engineering Department at South-Russian State Polytechnic University (NPI), e-mail: [gmm1000@yandex.ru](mailto:gmm1000@yandex.ru).

ORCID: 0000-0002-5286-0403

**Roman M. Sinetsky** – Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the Software Engineering Department at South-Russian State Polytechnic University (NPI), e-mail: [rmsin@npi-tu.ru](mailto:rmsin@npi-tu.ru).

ORCID: 0000-0001-6810-6109

## 1. Введение

Во многих отраслях производства и других сферах человеческой деятельности широко применяются машины и оборудование, использующие тягу стальных канатов. Примерами такого оборудования являются грузовые и пассажирские лифты, канатные дороги, шахтные и буровые подъемные установки и т.д. В настоящее время число вышеперечисленных машин, находящихся в эксплуатации на территории России, составляет более 1 млн. единиц и в обозримом будущем вследствие развития жилищного строительства, это число существенно возрастет. В механизме функционирования подобных машин стальные канаты являются важнейшими элементами, а техническое состояние стальных канатов является важнейшим фактором обеспечения безопасности их эксплуатации. Наиболее распространенным способом обнаружения дефектов стальных канатов является визуальный и измерительный контроль [1 - 3]. Его применяют повсеместно при техническом обслуживании, диагностике, контрольной и надзорной деятельности [4 - 8].

В процессе выполнения контроля выявляются признаки наличия или отсутствия

определенных типов дефектов каната и принимается решение о возможности или невозможности его дальнейшей эксплуатации [9 - 13]. Вследствие большого количества стальных канатов, находящихся в эксплуатации, высокой трудоемкостью и стоимостью выполняемых операций, связанных с выявлением дефектов, обеспечение требований безопасности невозможно без решения задачи автоматизации контроля.

В настоящее время для решения этой задачи предложено использовать технологию и поддерживающий ее программно-аппаратный комплекс. Комплекс предназначен для автоматизированного фото- и видеоконтроля поверхности стальных канатов с применением методов компьютерного зрения и искусственных нейронных сетей, обеспечивающих автоматическое обнаружение и идентификацию поверхностных дефектов с последующей интегральной оценкой браковочных показателей [14].

## 2. Постановка задачи

Целью настоящей работы является разработка и изложение основных подходов к алгоритмизации задач видеоскопического кон-

троля состояния стальных канатов, сложившихся в процессе разработки и реализации проекта программно-аппаратного комплекса, оценке его эффективности и результатов апробации основных алгоритмов.

Для достижения цели в работе решены следующие задачи:

- обоснован состав математического обеспечения задач контроля
- разработаны, программно реализованы и апробированы алгоритмы обнаружения основных типов дефектов;
- определен состав основных показателей для оценки эффективности программ обнаружения дефектов.

### 3. Математическое обеспечение задачи обнаружения дефектов в изображениях стальных канатов

Основными дефектами стальных канатов и связанными с ними нормами браковки являются следующие:

- обрывы наружных проволок на фиксированной длине  $6d$ ,  $30d$  (где  $d$  – диаметр стального каната);
- поверхностный износ, связанный с уменьшением диаметра наружных проволок на 40% и более;
- местное увеличение или уменьшение диаметра каната на 7%;

– деформация в виде волнистости при  $d_b \geq 1.08d_k$  (где  $d_b$  и  $d_k$  диаметр волнистости и диаметр каната);

– повреждения в результате температурного воздействия или электрического дугового разряда (в т.ч. удара молнии), определяемые по изменению цвета поверхности каната в месте разряда.

Предлагаемый состав алгоритмов, входящих в математическое обеспечение задачи обнаружения дефектов канатов, схематично показан на рис. 1. В состав математического обеспечения входят две группы алгоритмов: алгоритмы обнаружения дефектов; вспомогательные алгоритмы настройки и обучения.

Группа алгоритмов обнаружения дефектов решает основные функциональные задачи контроля и включает:

- алгоритм обнаружения дефектов геометрии каната, состоящий из двух блоков: увеличения/уменьшение диаметра, деформации в виде волнистости;
- группу алгоритмов обнаружения аномальных структурных деформаций поверхности каната, включающих алгоритмы: обнаружения обрывов наружных проволок, поверхностного износа и повреждений в результате температурного воздействия или электрического дугового разряда.

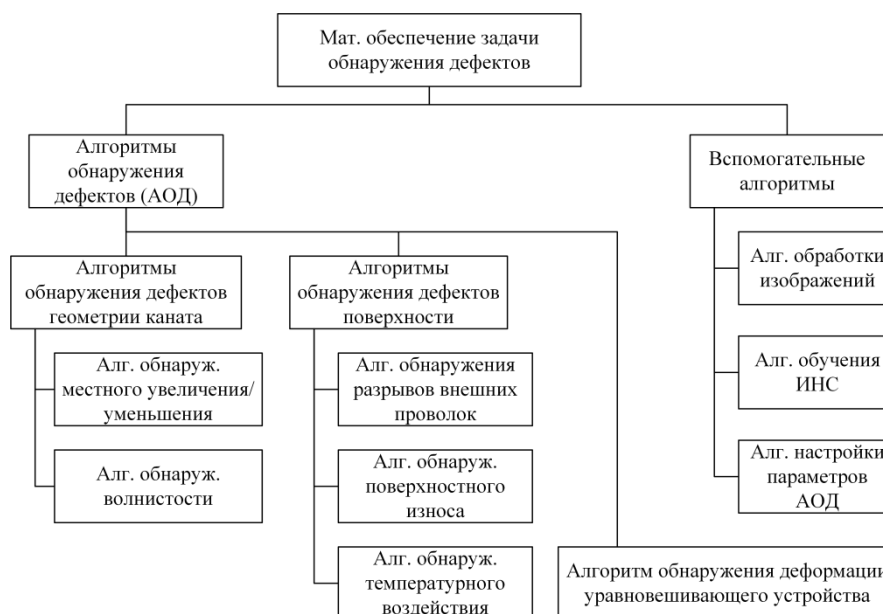


Рис. 1. Математическое обеспечение задачи обнаружения дефектов

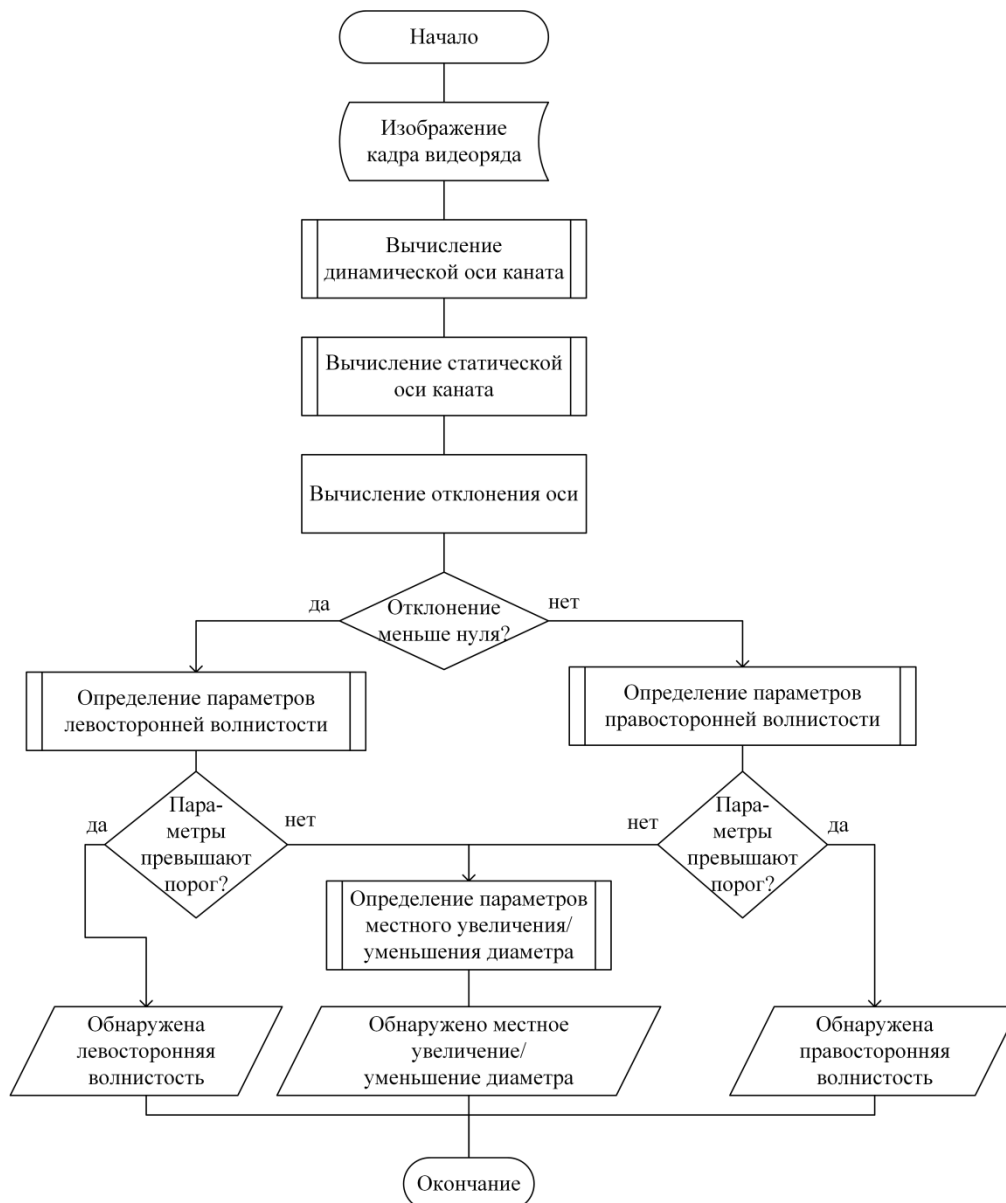


Рис. 2. Схема алгоритма обнаружения дефектов геометрии каната

Группа вспомогательных алгоритмов включает:

- настроечные алгоритмы, предназначенные для расчета и построения различных математических объектов – пороговых значений параметров, функций и т.п., которые используются в качестве параметров в алгоритмах обнаружения дефектов;

- набор функций, реализующих типовые операции и преобразования методов цифровой обработки изображений (эти функции входят в состав программных библиотек);

- алгоритмы библиотек, предназначенные для построения искусственных нейронных

сетей, их обучения и применения при детектировании дефектов стальных канатов.

При разработке алгоритмов обнаружения аномальных структурных деформаций поверхности каната рассматривалось два основных подхода:

- моделирование зрительной функций человека и логики визуального анализа, используемых при обнаружении дефектов в стальных канатах;

- моделирование функции самообучения обнаружению и классификации дефектов с применением искусственных нейронных сетей.

Алгоритмы, основанные на реализации первого подхода, представляют собой ком-

плекс оригинальных эвристических процедур морфологического анализа контуров поверхности каната. Процедуры моделируют процессы технического (компьютерного) зрения с применением широкого набора типовых операций, преобразований и методов цифровой обработки изображений, операций, преобразований и методов аналитической геометрии на плоскости и ряда других численных методов.

Алгоритмы, основанные на втором подходе, кроме указанных эвристических процедур моделирования компьютерного зрения, используют многослойную сверточную нейронную сеть.

Рассмотрим логику функционирования ключевых алгоритмов обнаружения дефектов.

#### 4. Алгоритмы видеоскопического контроля состояния стальных канатов

4.1. Алгоритм обнаружения дефектов геометрии каната. Укрупненная схема алгоритма обнаружения дефектов геометрии каната представлена на рис. 2. Алгоритм имеет следующую логику функционирования.

Исходное трехканальное изображение текущего кадра преобразуется в одноканальное изображение  $I$  в оттенках серого и выделяются контуры краев каната.

При помощи отдельной процедуры формируются проекции динамической и статической осей каната на плоскость изображения.

Динамическая ось не является прямой линией и проходит через центры тяжести сечения каната вдоль оси  $Y$ , т.е. имеет вероятностный характер смещений относительно поперечных сечений, которые зависят от многочисленных отклонений параметров технологии его изготовления и эксплуатационных факторов при навеске и эксплуатации.

Видеоаналитика каната при его движении позволила установить зависимость изменения диаметра каната по его длине и шагом колебания динамической оси, приблизительно, равным длине интервала между вершинами соседних прядей по его контуру. На рис. 3 представлена 3D модель шестипрядного каната с поперечными и продольными разрезами, на которых показана статическая

и динамическая оси. Динамическая ось проходит через центры масс поперечных сечений по длине с учетом наличия технологических эксплуатационных отклонений. Статическая ось на рис. 3 является усредненной прямой точек центра тяжести всех сечений по длине каната.

Проекция динамической оси строится в форме последовательности точек  $o(x_i, y_i)$ ,  $(x_i, y_i) \in X \times Y$  для каждого изображения видеоряда. Проекция статической оси строится путем линейной аппроксимации проекций динамических осей всех изображений видеоряда, в результате которой каждой точке  $o(x_i, y_i)$  проекции динамической оси любого изображения каната ставится в соответствие точка  $s(x_i^*, y_i)$  проекции статической оси.

При наличии дефекта типа «волнистость» имеет место выраженное одностороннее смещение динамической оси относительно статической. При наличии дефекта типа «местное увеличение/уменьшение диаметра», динамическая ось не имеет выраженного одностороннего смещения.

После построения осей алгоритм определяет границы интервалов смещений динамической оси слева и справа от статической оси, имеющих характер выпуклостей. Затем анализирует ширину «выпуклых интервалов» и величину смещений (амплитуды выпуклостей). По совокупности признаков определяется тип дефекта.

В качестве признака наличия волны используются условия:

– сопоставимость ширины  $H_e$  выпуклого интервала  $d^* = [a, b]$  с шагом свивки каната  $H_k$ :

$$\Delta \leq \min \{H_e, H_k\} / \max \{H_e, H_k\} \leq 1,$$

где  $\Delta \in [0.5, 0.99]$  – эмпирически подбираемое значение;

– превышение амплитуды выпуклого интервала допустимой величины  $d_e / d_k > 1.08$ ,

$$d_e = d + \delta, \quad \delta = \max_{x_i \in d^*} \{ |x_i^* - x_i| \},$$

где  $d$  – диаметр каната в области вершины выпуклого интервала  $d^* = [a, b]$ ,  $d_k$  – номинальный диаметр каната.

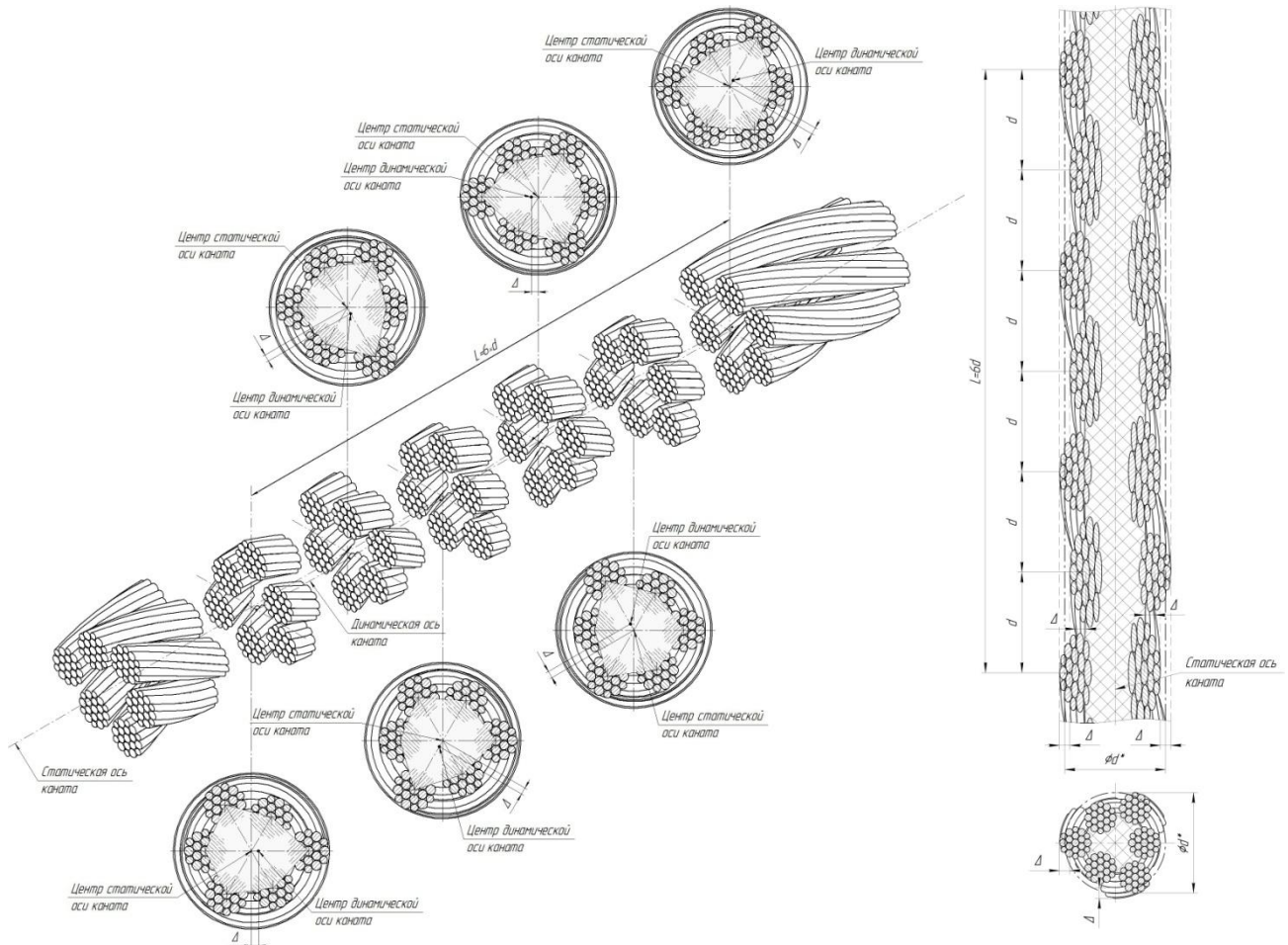


Рис. 3. Модель шестирядного каната с наличием технологических и эксплуатационных отклонений

Для определения признаков наличия или отсутствия дефекта типа «местное увеличение/уменьшение диаметра» вычисляется 3 допустимых коридора – слева, справа от статической оси и средний коридор между ними:

$$cor_{лев} = [x_i^* - k_1 r_{ном}, x_i^* - k_2 r_{ном}],$$

$$cor_{прав} = [x_i^* + k_2 r_{ном}, x_i^* + k_1 r_{ном}], \quad k_1 > k_2,$$

$$cor_{средний} = [x_i^* - k_2 r_{ном}, x_i^* + k_2 r_{ном}],$$

где  $k_1, k_2$  – коэффициенты, значения которых выбираются в зависимости от номинального диаметра и точности изготовления каната [3].

Дефект типа «местное утолщение» фиксируется, если контурные точки  $C_i^n = C(x_i^n, y_i^n)$ ,  $C_i^n = C(x_i^n, y_i^n)$  левого и/или правого краев каната выходят из левого/правого коридоров соответственно. Это означает выполнение условия:

$$(x_i^n < x_i^* - k_1 r_{ном}) \vee (x_i^n > x_i^* + k_1 r_{ном}) \forall i.$$

Дефект типа «местное утоньшение» фиксируется, если контурные точки  $C_i^n, C_i^n$  краев каната попадают в средний коридор. Это означает выполнение условия:

$$(x_i^n > x_i^* - k_2 r_{ном}) \vee (x_i^n < x_i^* + k_2 r_{ном}) \forall i.$$

Если дефекты обнаружены, то само изображение, идентификатор типа дефекта и дополнительные параметры сохраняются в отдельном файле.

4.2. Алгоритм обнаружения дефекта типа «обрыв внешних проволок». Схема алгоритма обнаружения дефектов типа «обрыв внешних проволок» приведена на рис. 4. Алгоритм имеет следующую логику функционирования.

В изображении  $I$  выделяется полный контур поверхности каната. Полный контур поверхности включает контурные линии краев каната, линии прядей, множество ложных контурных линий, наличие которых связано с оптическими помехами и другими фактора-



Рис. 4. Схема алгоритма обнаружения

ми, сопровождающими процесс видеорегистрации.

Затем при помощи вспомогательного алгоритма сегментации (разметки) на изображении поверхности выделяются «зоны свивки». Под зоной свивки понимается замкнутая область изображения, ограниченная двумя

контурными линиями соседних волокон каната.

Пример результата разметки показан на рис. 5, а, пример полного контура одной зоны свивки – на рис. 5, б. Для каждой зоны свивки выполняются следующие операции.

В полном контуре  $P_i$  каждой зоны анализа ( $i$  – индекс зоны) выделяются следующие контурные линии:

– линии, которые могут соответствовать контурным линиям проволок, для этого используются заданные условия и ограничения пространственной ориентации этих линий на плоскости и их длины;

– ложные контурные линии, длина которых меньше минимально возможной длины линии проволок.

Совокупность этих линий определяет контур (множество)  $S_i$ . Путем удаления контура  $S_i$  из контура  $P_i$  формируется остаточный контур  $E_i = P_i \setminus S_i$ .

В остаточном контуре  $E_i$  выделяется подмножество  $B_i \subset E_i$  характерных контуров ( $B_i$  может быть пустым), интерпретируемых как контуры обрывов. Признаки характерных контуров были выбраны в результате визуального анализа большого числа изображений полных контуров поверхности каната и локализации областей обрывов на этих контурах.

К характерным контурам относятся:

– короткие линии, для которых длина и пространственная ориентация на плоскости удовлетворяют заданным условиям и ограничениям;

– замкнутые контуры, площадь которых сопоставима с номинальной площадью сечения проволок.

Описанная процедура анализа применяется ко всем зонам свивки. В результате формируется множество характерных контуров  $G = \bigcup_i B_i$  всего изображения  $I$ . Если  $G \neq \emptyset$ , то это изображение и его идентификационные данные сохраняются в отдельном файле «дефектных кадров».

4.3. Алгоритм обнаружения дефекта типа «температурное воздействие». Темпе-

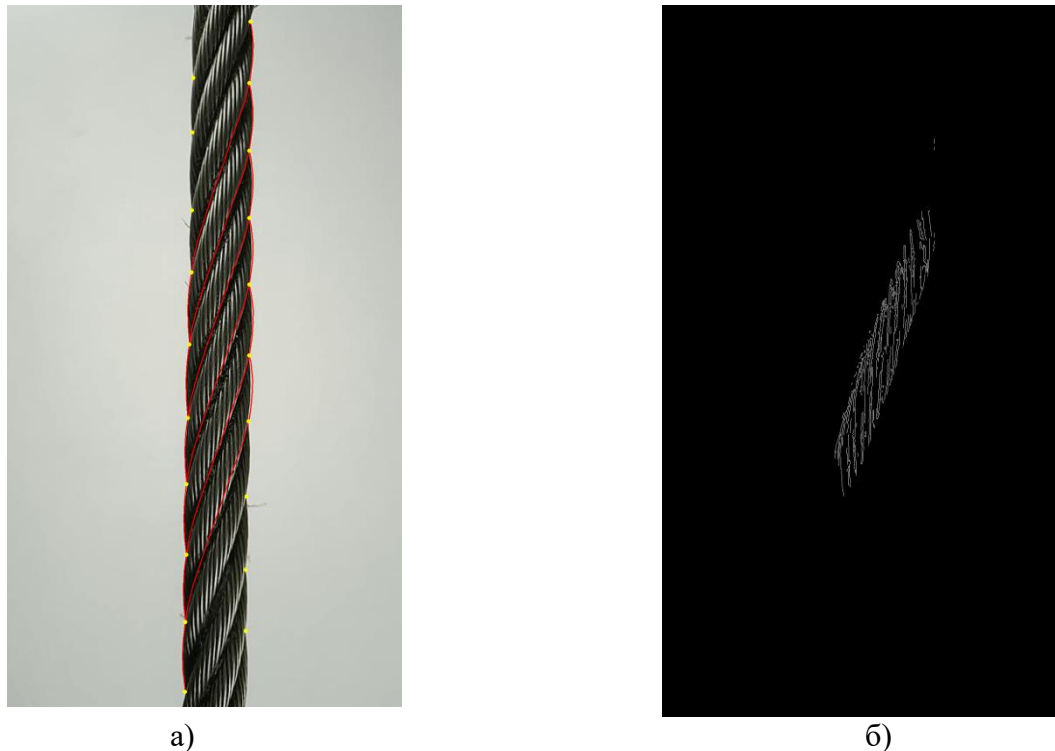


Рис. 5. Результаты разметки:

а) разметка зон свивки на изображении каната; б) полный контур одной зоны свивки

ратурное воздействие обычно возникает в результате электрического разряда потенциалов, возникающих на расположенных вблизи кабелях, или удара молнии. Визуально температурное воздействие проявляется на поверхности каната в виде характерных следов оплавления внешних проволок. Для обнаружения подобных следов на изображении была использована многослойная последовательная сверточная нейронная сеть глубокого обучения [15]. Схема алгоритма обнаружения дефекта представлена на рис. 6, а структура нейросети – на рис. 7.

Исходное изображение кадра видеоряда разрешением 1920 строк на 1080 столбцов с тремя 8-битными каналами цвета (красный, зеленый, синий) преобразуется к одноканальному 8-битному изображению в оттенках серого цвета того же разрешения, а затем к изображению с одним каналом 32-битных значений с плавающей точкой в диапазоне значений  $[0, 1]$ . Данное изображение преобразуется к формату входного тензора нейронной сети и подается на первый слой.

Первый слой  $C_1$  нейронной сети состоит из 32 сверточных фильтров размером  $5 \times 5$  с шагом  $(5, 5)$  и повторяющимся заполнением

при обработке граничных элементов. В качестве функции активации выбран блок линейной ректификации [16]. Входной тензор слоя и нейронной сети имеет размерность  $(N, 1920, 1080, 1)$ , где  $N$  – размер пакета нейронной сети. Выходной тензор слоя  $C_1$  имеет размер  $(N, 384, 216, 1)$ .

Второй слой  $C_2$  нейронной сети состоит из 8 сверточных фильтров размером  $2 \times 2$  с шагом  $(1, 1)$ , повторяющимся заполнением при обработке граничных элементов и блоком линейной ректификации в качестве функции активации. Выходной тензор слоя  $C_2$  имеет размер  $(N, 384, 216, 1)$ .

Третий слой  $P_1$  нейронной сети представляет собой слой субдискретизации с функцией максимума и размером  $2 \times 2$ . Выходной тензор слоя  $P_1$  имеет размер  $(N, 192, 108, 1)$ .

Четвертый слой  $C_3$  нейронной сети состоит из одного сверточного фильтра, аналогичного используемому в слое  $C_2$ . Выходной тензор слоя  $C_3$  имеет размер  $(N, 192, 108, 1)$ . Пятый слой  $P_2$  по структуре аналогичен слою  $P_1$ . Выходной тензор слоя  $P_2$  имеет размер  $(N, 96, 54, 1)$ . После пятого слоя нейронной сети выполняется конвертация размерности из тензора  $(N, 96, 54, 1)$  в тензор

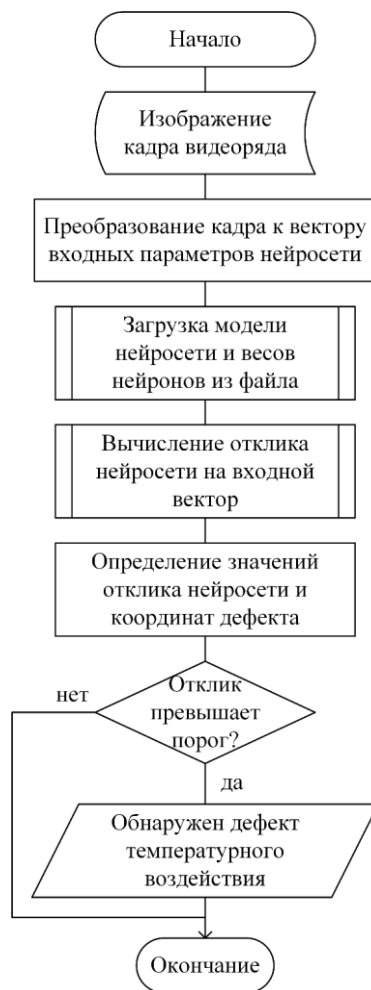


Рис. 6. Схема алгоритма обнаружения дефектов типа «температурное воздействие»

размерности  $(N, 5184, 1)$ , который подается на вход шестого слоя.

Шестой слой  $D_1$  нейронной сети представляет собой полносвязный слой из 5184 персептронов с блоком линейной ректификации в качестве функции активации. Выходной тензор слоя имеет размер  $(N, 5184, 1)$ .

Седьмой слой  $D_2$  нейронной сети аналогичен шестому, выходной тензор слоя также имеет размер  $(N, 5184, 1)$ .

Для снижения влияния эффекта переобучения после слоев  $C_1, P_1, P_2$  и  $D_1$  выполняется прореживание выходных функций нейронов с вероятностью 0.2.

Выход слоя  $D_2$  с размерностью  $(N, 5184, 1)$  преобразуется в тензор размерностью  $(N, 96, 54, 1)$ , который является выходом  $O$  нейронной сети.

Элемент  $O_i$  выходного тензора  $O$ ,  $i=0..N$  можно интерпретировать как матрицу размером  $96 \times 54$ :

$$O_i = [o_{x,y}^i], x = 0..53, y = 0..95, o_{x,y}^i \in \mathbb{R}.$$

Элемент  $o_{x,y}^i$  матрицы соответствует квадрату  $20 \times 20$  пикселей входного изображения  $I_i$ , что составляет примерно  $1 \times 1$  мм. Значение  $o_{x,y}^i$  тем выше, чем больше отклик нейронной сети на нахождение дефекта термического воздействия в соответствующем квадрате. Значения пикселей изображения  $O_i$  нормализуются к диапазону  $[0, 1]$ :

$$o_{x,y}^i = \frac{o_{x,y}^i - \min(O_i)}{\max(O_i) - \min(O_i)},$$

$$x = 0..53, y = 0..95.$$

Наличие дефекта типа «термическое воздействие» фиксируется при выполнении условия:

$$o_{x,y}^i \geq \delta,$$

где  $\delta \in [0, 1]$  – эмпирически подобранный порог. Координаты  $(x, y)$  определяют зону обнаруженного дефекта.

При обучении нейросети использовалась функция потерь категориальной перекрестной энтропии, метрика оценки – точность, оптимизация в алгоритме обратного распространения ошибки методом адаптивной оценки моментов [17]. Размер пакета обучения нейронной сети  $N=10$ . Обучение выполнялось в течение 1000 эпох. Величина метрики точности по окончании обучения достигла 0.996.

На рис. 8 показан результат оценки нейросетью кадра видеопотока, содержащего дефект термического воздействия. В левой части рисунка показано изображение  $O_i$  размером  $96 \times 54$ , на котором видны две точки отклика нейросети на нахождение дефекта. В правой части рисунка показано изображение каната, на котором красными окружностями выделены соответствующие найденные места дефектов.

4.4. Результаты предварительной апробации программ видеоскопического анализа стальных канатов. Рассмотренные алгоритмы реализованы в виде программных модулей, вызываемых из модуля управления. Программные модули написаны на языке Python 3. Нейронная сеть была реализована с



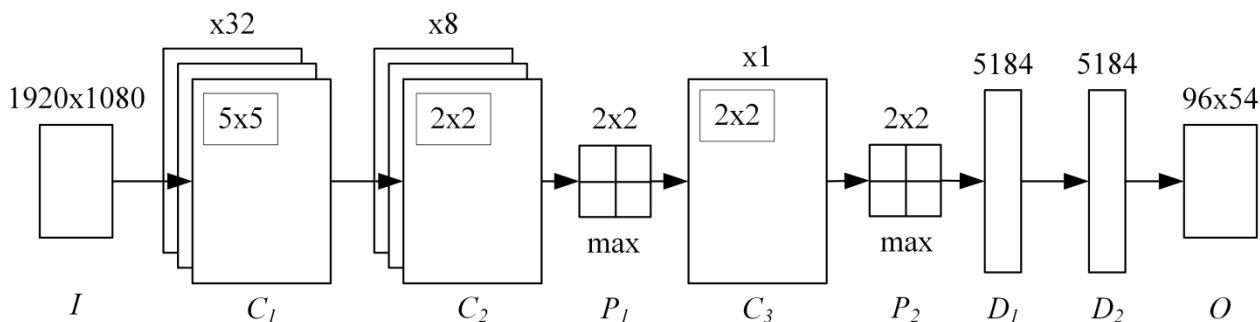
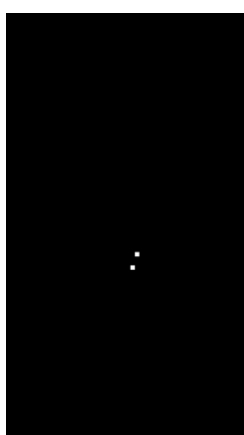


Рис. 7. Структура нейронной сети



а)



б)

Рис. 8. Результат работы алгоритма обнаружения дефектов типа «температурное воздействие»: а) отклик нейросети; б) выделение мест дефектов

использованием библиотек TensorFlow [18] и Keras [19]. Для обработки изображений применена библиотека OpenCV 4 [20, 21]. В качестве исходных данных для отладки, настройки параметров и апробации алгоритмов использовалась заранее сформированная база данных «Видеопотоки типовых дефектов стальных канатов» для канатов диаметром 9.1 мм [22].

На рис. 9 показано по одному выборочному примеру, иллюстрирующему результаты программного обнаружения дефектов.

### 5. Показатели эффективности алгоритмов и программ обнаружения дефектов

В дальнейшем, для апробации разработанных алгоритмов и программ в натуральных экспериментах, в качестве показателей их эффективности, предполагается использоваться следующие показатели:

– оценка вероятности  $P_i^*$  правильного (безошибочного) обнаружения дефекта каждого типа:

$$P_i^* = n_i^* / N_i^*,$$

где  $N_i^*$  – количество «дефектных» изображений в видеоряде, содержащих дефект  $i$ -го типа,  $n_i^*$  – количество изображений из состава «дефектных» изображений, в которых обнаружен дефект  $i$ -го типа;

– время  $T_L = T_1 \cdot L$ , затрачиваемое на обработку видеоряда из  $L$  кадров (здесь  $T_1$  – время, затрачиваемое на обработку одного кадра видеоряда).

Кроме указанного основного вероятностного показателя  $P_i^*$ , определяющего надежность обнаружения дефектов, можно использовать дополнительный показатель  $\tilde{p}$  – оценку вероятности ложного обнаружения дефекта любого типа (вероятности «ложной тревоги»):

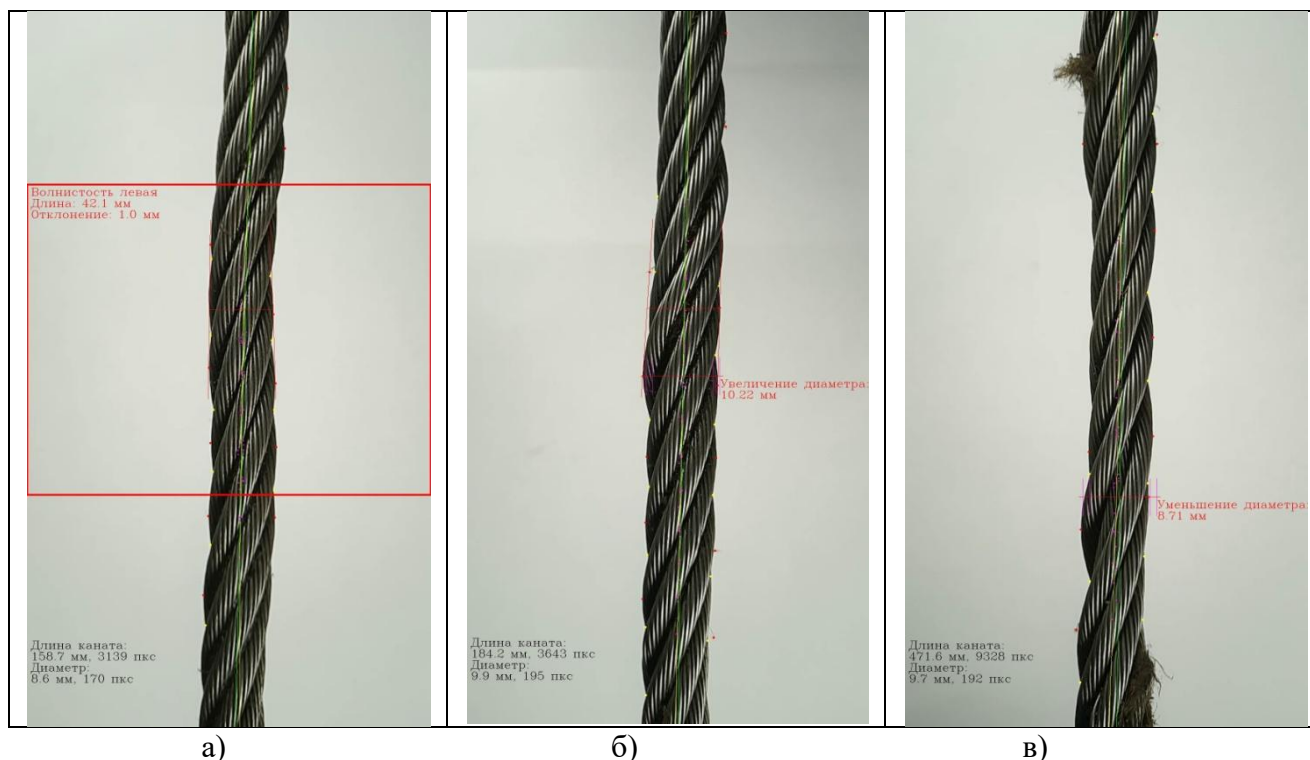


Рис. 9. Иллюстрация работы программного обеспечения обнаружения дефектов стальных канатов: а) дефект волнистости; б) дефект локального увеличения диаметра; в) дефект локального уменьшения диаметра

$$\tilde{p} = \tilde{k} / N,$$

где  $\tilde{k}$  – количество ошибочных обнаружений дефектов любого типа в изображениях, не содержащих дефектов поверхности каната,  $N$  – количество изображений во всем видеоряде, не содержащих дефектов поверхности.

В настоящее время программное обеспечение для решения задачи обнаружения дефектов находится в стадии отладки. Время обработки одного изображения размерностью  $1920 \times 1080$  составляет  $T_1 \approx 3$  с. В процессе контрольной видеорегистрации каната длиной 0.5 м формируется видеоряд, состоящий из 700...900 кадров. Таким образом, приблизительное время обработки  $T_L$  видеоряда составляет  $T_L \approx 4 \div 5$  мин. Обработка выполнялась на ПК с процессором Intel Core i5-12600K с частотой 3.70 ГГц.

## 6. Заключение

Разработанные алгоритмы и программы автоматического обнаружения дефектов в

изображениях стальных канатов и результаты их предварительной апробации свидетельствуют о конструктивности и эффективности обоих предложенных подходов к алгоритмизации задачи контроля.

С использованием первого подхода, основанного на машинном моделировании логики визуального анализа изображений, получены работоспособные алгоритмы и программы обнаружения дефектов геометрии каната. На основе второго подхода с применением искусственных нейронных сетей получены работоспособные алгоритмы и программы обнаружения аномальных структурных дефектов поверхности. В процессе отладки программного обеспечения определены направления совершенствования алгоритмов. В основном, эти направления связаны с разработкой процедур предварительной обработки изображений и обучения – фильтрации оптических помех, удаления ложных контуров, настройки параметров нейросети.

## Список литературы

1. ГОСТ Р EN 13018-2014 «Контроль визуальный. Общие положения». Москва, Стандартинформ, 2015.
2. Канаты стальные. Контроль и нормы браковки. РД РОСЭК 012-97 // Короткий А.А., Хальфин М.Н., Иванов Б.Ф., Котельников В.С. – 52 с.
3. ГОСТ Р 3241-91 Канаты стальные. Технические условия. Москва, Стандартинформ, 1993.
4. Панфилов А.В., Короткий А.А., Иванов Б.Ф., Юсупов А.Р. Контроль канатов при эксплуатации машин с канатной тягой // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №4. С. 330-338. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-04-330-338
5. Панфилов А.В., Короткий А.А., Иванов Б.Ф., Панфилова Э.А. О критериях и нормах браковки канатов пассажирских канатных дорог // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №1. С. 53-65.
6. Gavrikov M.M., Sinetsky R.M., Mezentseva A.Y. Structural approximation algorithms for one-dimensional analysis of 3D-images in the problem of metrological control of surfaces of large industrial products // 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 25-29 March 2019, IEEE. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743054.
7. Gavrikov M., Sinetsky R., Knyazev D. Technology and software of system of the metrological analysis of cellular cylindrical surfaces of large-size products // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 19-20 May 2016, IEEE - p. 4 - DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911603
8. Гавриков М.М., Синецкий Р.М., Мезенцева А.Ю., Захаров М. А., Петров М. С. Алгоритмическая реализация структурно-аппроксимационного подхода к метрологическому 3D-контролю ячеистых поверхностей промышленных изделий. // Технология машиностроения. 2017. №10. С. 50-58.

## References

1. GOST R EN 13018-2014. Visual control. General provisions. Moscow, Standartinform, 2015. (In Russian)
2. Korotkij A.A., Halfin M.N., Ivanov B.F., Kotelnikov V.S. Kanaty stalnye. Kontrol i normy brakovki. Moscow, RD ROSEK 012-97. 52 p. (In Russian)
3. GOST R 3241-91. Kanaty stalnye. Tehnicheskie usloviya. Moscow, Standartinform, 1993. (In Russian)
4. Panfilov A.V., Korotkiy A.A., Ivanov B.F., Yusupov A.R. Control of ropes during the operation of machines with rope traction. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.4 DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-04-330-338 (In Russian)
5. Panfilov A.V., Korotkiy A.A., Ivanov B.F., Panfilova E.A. About the criteria and standards for the rejection of ropes of passenger cable cars. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No. 1, pp. 53-65. (In Russian)
6. Mikhail M. Gavrikov, Roman M. Sinetsky, Anna Y. Mezentseva. Structural approximation algorithms for one-dimensional analysis of 3D-images in the problem of metrological control of surfaces of large industrial products. In: 2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russia, 25-29 March 2019, IEEE. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743054.
7. M. Gavrikov, R. Sinetsky, D. Knyazev. Technology and software of system of the metrological analysis of cellular cylindrical surfaces of large-size product. In: 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Chelyabinsk, Russia, 19-20 May 2016, IEEE - p. 4 - DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911603
8. M.M. Gavrikov, R.M. Sinetsky, A.Y. Mezentseva, Zakharov M. A., Petrov M. S. Algorithmic realization of structural-approximation approach to metrological 3d control of cellular surfaces of industrial products. *Tehnologiya mashinostoeniya*, 2017, No.10, pp. 50-58. (In Russian)

9. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13 ноября 2020 года № 441 «Об утверждении федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности пассажирских канатных дорог и фуникулеров». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573191373?marker=6520IM>.

10. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 13.04.2022. № 120. 13.04.2022 № 120 «О внесении изменений в федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности», утверждённые приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 октября 2020 г. № 420» (Зарегистрирован 06.06.2022 № 68752) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202206070009>.

11. 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.

12. ГОСТ Р 55964-2014 Лифты. Общие требования безопасности при эксплуатации. Москва, Стандартинформ, 2014.

13. ГОСТ Р 54999-2012 Лифты. Общие требования к инструкции по техническому обслуживанию лифтов. Москва, Стандартинформ, 2014.

14. Пат. 2775348 D07/B, B66B, G05B, Рос. Федерация. Способ визуально-измерительного контроля стального каната / Короткий А.А., Панфилов А.В. Заявл. 23.03.2021; опубл. 29.06.2022

15. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python. Питер, 2018. 400 с.

16. Glorot X., Bordes A., Bengio Y. Deep sparse rectifier neural networks. In AISTATS'2011.

9. Prikaz Federalnoj sluzhby po jekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 13 nojabrja 2020 goda № 441 «Ob utverzhenii federal'nyh norm i pravil v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila bezopasnosti passazhirskih ka-natnyh dorog i funikulerov». Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573191373?marker=6520IM>. (In Russian)

10. Prikaz Federalnoj sluzhby po jekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 13.04.2022. № 120. 13.04.2022 № 120 «O vnesenii izmenenij v federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila provedenija jekspertizy promyshlennoj bezopasnosti», utverzhdonnye prikazom Federalnoj sluzhby po jekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 20 oktjabrja 2020 g. № 420» (Zaregistririvan 06.06.2022 № 68752) Available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202206070009>. (In Russian)

11. Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila bezopasnosti opasnyh proizvodstvennyh obektov, na kotoryh ispolzujutsja podemnye sooruzhenija». Utv. Prikazom Federalnoj sluzhby po jekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 26.11.2020 g. № 461. (In Russian)

12. GOST R 55964-2014. Elevators. General safety requirements during operation. Moscow, Standartinform, 2014. (In Russian)

13. GOST R 54999-2012. Elevators. General requirements for elevator maintenance instructions. Moscow, Standartinform, 2012. (In Russian)

14. Patent RU 2775348. *Sposob vizualnoizmeritelnogo kontrolya stalnogo kanata* [Method of visual and measuring control of steel rope]. Korotkiy A.A., Panfilov A.V. Declared 23.03.2021. Published 29.06.2022. (In Russian)

15. F. Chollet. Deep Learning with Python. Manning, 2018. 386 p.

16. Glorot, X., Bordes, A., and Bengio, Y. Deep sparse rectifier neural networks. In AISTATS'2011.

17. Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aa-

17. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение. М.: ДМК Пресс, 2018. 652 с.
18. Dean J., Monga R., Ghemawat S. TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems. – URL: <http://download.tensorflow.org/paper/whitepaper2015.pdf> (Дата обращения: 27.01.2023)
19. Джулли А., Пал С. Библиотека Keras - инструмент глубокого обучения. ДМК Пресс, 2018. 294 с.
20. Буэно, Суарес, Эспиноса. Обработка изображений с помощью OpenCV. М.: ДМК-Пресс, 2016. 210 с.
21. Joseph H., Joe M. Learning OpenCV 4 Computer Vision with Python 3. Packt Publishing, 2020. 372 p.
22. Свидетельство о государственной регистрации базы данных «Видеопотоки типовых дефектов стальных канатов» №2022622779, дата регистрации 08.11.2022 г.
- † ron Courville. Deep Learning. Available at: <https://www.deeplearningbook.org/>
- † 18. Dean Jeff, Monga Rajat, Ghemawat Sanjay. TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems. Available at: <http://download.tensorflow.org/paper/whitepaper2015.pdf>
- † 19. Джулли А., Пал С. Библиотека Keras - инструмент глубокого обучения. ДМК Пресс, 2018. 294 с.
- † 20. Bueno Suarez, Espinosa. Learning Image Processing with OpenCV. Packt Publishing, 2015. 232 p.
- † 21. Joseph Howse, Joe Minichino. Learning OpenCV 4 Computer Vision with Python 3. 3rd Edition. Packt Publishing, 2020. 372 p.
- † 22. Videopotoki tipovyh defektov stal'nyh kanatov. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM [Video streams of typical defects in steel ropes. The Certificate on official registration of the computer program] No. 2022622779, 08.11.2022. (In Russian)

УДК (UDC) 625.1/5

АНАЛИЗ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ОДНОПРОЛЕТНЫХ МОБИЛЬНЫХ  
КАНАТНЫХ ДОРОГ НА БАЗЕ САМОХОДНЫХ ШАССИALTERNATIVE VARIANTS ANALYSIS OF SINGLE-SPAN MOBILE ROPEWAYS  
BASED ON SELF-PROPELLED CHASSISТаричко В.И.<sup>1</sup>, Лагереv И.А.<sup>2</sup>  
Tarichko V.I.<sup>1</sup>, Lagerev I.A.<sup>2</sup><sup>1</sup> – АО «Конструкторское бюро специального машиностроения» (Санкт-Петербург, Россия)<sup>2</sup> - Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)<sup>1</sup> – Open Joint Stock Company «Special Design Bureau of machine building» (Saint Petersburg, Russian Federation)<sup>2</sup> - Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** В настоящее время в качестве одного из перспективных видов быстро разворачиваемых транспортных систем рассматриваются мобильные канатные дороги, формирующиеся с помощью объединенных единой подвесной несущо-тяговой канатной системой двух транспортно-перезрузочных канатных комплексов на базе автономных самоходных шасси многоцелевого назначения. Ключевой проблемой при создании эффективных мобильных канатных дорог указанного вида является выбор их рационального конструктивного исполнения, позволяющего в результате проектирования получить наилучшие тактико-технические характеристики и показатели качества. В статье представлены и проанализированы возможные альтернативные варианты однопролетных мобильных канатных дорог на базе мобильных транспортно-перезрузочных канатных комплексов. На основании результатов сравнительного анализа установлен наиболее предпочтительный вариант - однопролетная одноканатная мобильная канатная дорога маятникового типа с несущо-тяговой канатной системой в виде замкнутого несущо-тягового каната с двумя параллельно расположенными ветвями. В статье рассмотрено типовое конструктивное исполнение наиболее предпочтительного варианта и описан принцип его работы, а также перечислены основные узлы и механизмы основного технологического оборудования, которое должно входить в состав мобильных транспортно-перезрузочных канатных комплексов.

**Ключевые слова:** мобильная канатная дорога, колесное шасси, маятниковый тип, конструкция, технические характеристики.

**Дата принятия к публикации:** 15.02.2023  
**Дата публикации:** 25.03.2023

**Сведения об авторах:**

**Таричко Вадим Игоревич** – кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора, АО «Конструкторское бюро специального машиностроения», e-mail: 32.6909@mail.ru  
ORCID: ID/0000-0003-0286-725X

**Abstract.** Currently, mobile ropeways are considered as one of the promising types of rapidly deployable transport systems, which are formed with the help of two transport and reloading rope complexes based on autonomous self-propelled multi-purpose chassis combined by a single aerial carrying-traction rope system. The key problem in creating effective mobile ropeways of this type is the choice of their rational design, which allows to obtain the best tactical and technical characteristics and quality indicators as a result of the design. The article presents and analyzes possible alternative variants of single-span mobile ropeways based on mobile transport and reloading rope complexes. Based on the results of the comparative analysis, the most preferred variant was established - a single-span single-rope mobile ropeway of the pendulum type with a carrying-traction rope system in the form of a closed carrying-traction rope with two parallel branches. The article considers the typical design of the most preferred variant and describes the principle of its operation, as well as lists the main components and mechanisms of the main technological equipment, which should be part of mobile transport and reloading rope complexes.

**Keywords:** mobile ropeway, wheeled chassis, pendulum type, design, technical characteristics.

**Date of acceptance for publication:** 15.02.2023  
**Date of publication:** 25.03.2023

**Authors' information:**

**Vadim I. Tarichko** – Candidate of Technical Sciences, Deputy general designer, OJSC Special Design Bureau of machine building, e-mail: 32.6909@mail.ru  
ORCID: ID/0000-0003-0286-725X



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

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

### Благодарности

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

### Acknowledgements

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

## 1. Введение

Однопролетные мобильные канатные дороги на базе самоходных колесных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов высокой грузоподъемности и проходимости, способных обеспечить автономную доставку к месту работы необходимое технологическое оборудование для проведения транспортно-перегрузочных операций и его оперативное развертывание, являются перспективным и эффективным видом современных многоцелевых канатных систем [1].

Новизна данного вида транспортной техники и невозможность использования в полной мере методов проектирования и расчета, разработанных к настоящему времени применительно к стационарным грузовым и пассажирским канатным дорогам [2 - 9], требуют создания научно обоснованных теоретических основ проектирования, расчета и моделирования рабочих процессов на всех стадиях жизненного цикла однопролетных мобильных канатных дорог на базе самоходных колесных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, а также разработки научно обоснованных практических рекомендаций для получения мобильных канатных дорог с предельными функциональными возможностями при обеспечении высоких показателей качества.

Одним из ключевых шагов для успешного решения указанной технической проблемы является выбор перспективного конструктивного исполнения однопролетных мобильных канатных дорог на базе самоходных колесных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, обеспечивающего получение многоцелевой канатно-транспортной системы с наилучшими показателями каче-

ства, такими как массо-габаритные и грузопро пространственные показатели, показатели надежности, энергоэффективности, экономичности и экологичности.

## 2. Альтернативные варианты мобильных канатных дорог

В зависимости от конструктивных особенностей несущее-тяговой канатной системы однопролетные мобильные канатные дороги на базе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов могут иметь несколько альтернативных вариантов исполнения, каждый из которых обладает как определенными технико-экономическими преимуществами, так и недостатками.

1. Исходя из возможного функционального назначения, стальные канаты, входящие в структуру несущее-тяговой канатной системы однопролетных мобильных канатных дорог, следует разделять на:

- несущие канаты (тип Н), воспринимающие весовые нагрузки со стороны транспортируемого груза и грузозахватных устройств или подвесных кабин;

- тяговые канаты (тип Т), обеспечивающие перемещение транспортируемого груза и грузозахватных устройств или подвесных кабин вдоль трассы мобильной канатной дороги между конечными пунктами погрузки и разгрузки;

- несущее-тяговые канаты (тип НТ), совмещающие обе указанные функции.

2. Исходя из вида трассы мобильной канатной дороги, формируемой канатом, следует различать:

- кольцевые канаты (тяговые, тип Тк; несущие, тип Нк; несущее-тяговые, тип НТк) с двумя параллельно протянутыми ветвями

каната между канатными шкивами сопряженных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов;

- линейные канаты (тяговые, тип Тл; несущие, тип Нл; несуще-тяговые, тип НТл) с одной протянутой ветвью каната между канатными шкивами сопряженных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов.

3. Исходя из вида организации перемещения транспортируемого груза между конечными пунктами погрузки и разгрузки мобильной канатной дороги, следует различать:

- мобильные канатные дороги кольцевого типа (тип К), реализующие непрерывное перемещение транспортируемого груза в одном направлении или его реверсивное перемещение в течение длительного времени;

- мобильные канатные дороги маятникового типа (тип М), реализующие возвратно-

поступательное перемещение транспортируемого груза.

Возможные сочетания вида организации перемещения транспортируемого груза вдоль трассы мобильной канатной дороги с типом используемых канатов и вида трассы позволяют сформировать совокупность возможных альтернативных вариантов (схемных решений) конструктивного исполнения однопролетных мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Они приведены на рис. 1. Условное обозначение схемного решения однопролетной мобильной канатной дороги формируется по следующему принципу: вид организации перемещения груза (К или М) – тип используемого каната (Н, Т или Нт) – вид трассы (к или л).

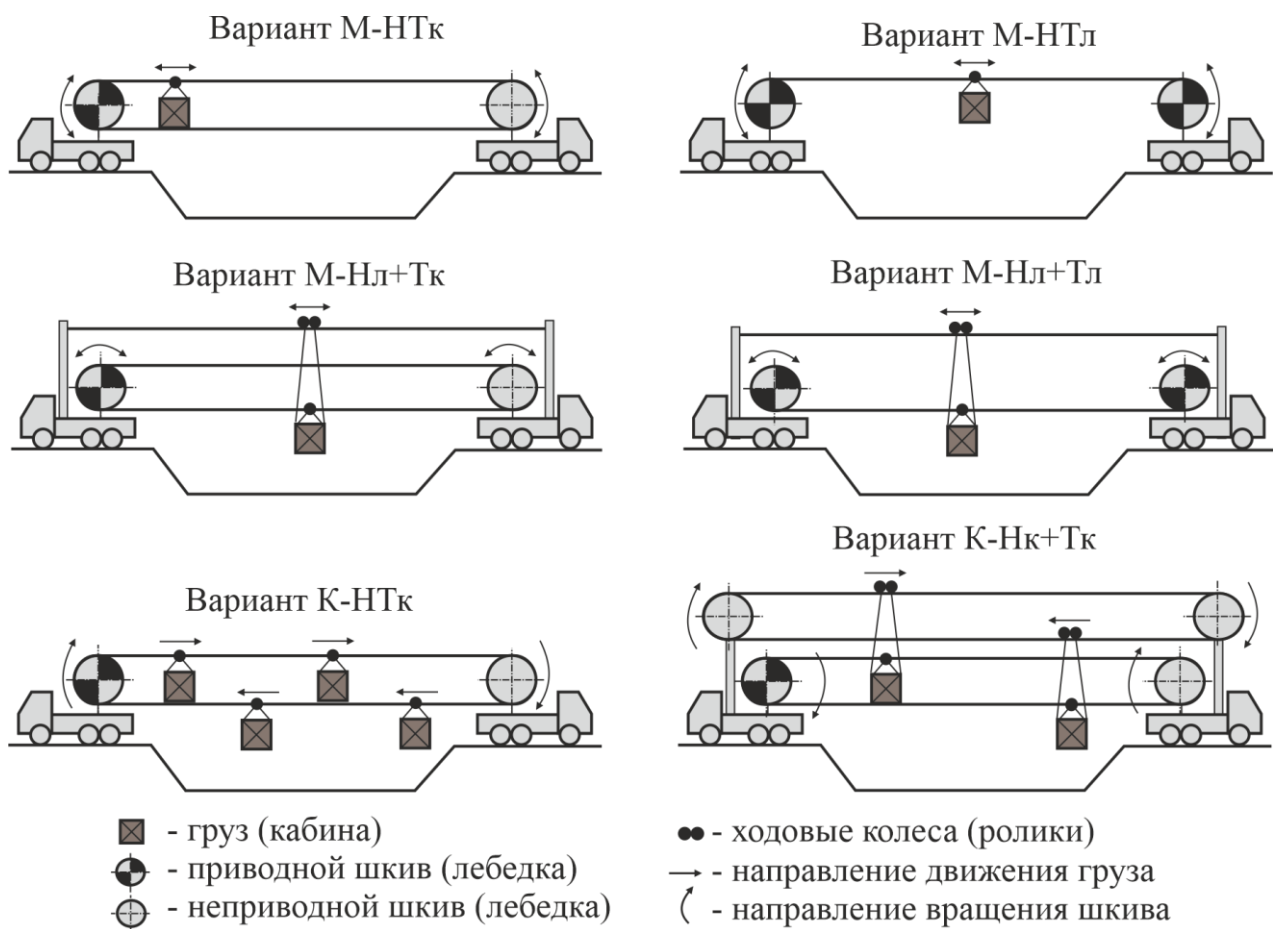


Рис. 1. Альтернативные варианты однопролетных мобильных канатных дорог на базе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов



### 3. Сравнительный анализ альтернативных вариантов

В табл. 1 и 2 представлены результаты анализа проявления положительных и негативных технико-экономических свойств у различных альтернативных вариантов однопролетных мобильных канатных дорог на базе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов.

Для выбора наиболее перспективных вариантов конструктивного исполнения мобильных канатных дорог следует учесть ряд специфических требований и ограничений, связанных именно со специфическими конструктивными и транспортными особенностями мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов на колесных шасси. В их числе:

1. Ограничение по суммарному весу основного технологического оборудования и, если возможно, дополнительного оснащения (запасные узлы, канаты, анкерочные устройства и др.), которое может быть размещено на несущей раме шасси при его автономном движении к месту развертывания мобильной канатной дороги. В частности, для 3-х...6-ти осных колесных шасси грузоподъемность может находиться в диапазоне 14...40 т [10].

2. Ограничение по горизонтальному поперечному габариту колесных шасси, составляющему ~ 2,7...3,0 м [10]. Это ограничение лимитирует, в частности, диаметр приводного канатного шкива, который должен составлять не более 2...2,5 м.

Таблица 1

Проявление положительных технико-экономических свойств у альтернативных вариантов однопролетных мобильных канатных дорог на базе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов

Наименование свойства	Вариант					
	М-НТк	М-НТл	М-Нл+Тк	М-Нл-Тл	К-НТк	К-Нк+Тк
Возможность одновременного встречного перемещения грузов	+		+		+	+
Использование каната одного типоразмера	+	+			+	
Сравнительно небольшая длина используемого каната	+	++		+	+	
Простота регулировки длины каната в зависимости от величины пролета между базовыми станциями		+				
Возможность опирания грузозахватного устройства на две ветви каната	+		+			
Сравнительно небольшая трудоемкость навешивания каната	+	++			+	
Отсутствие необходимости в устройствах соединения концов каната		+		+		
Отсутствие необходимости в дополнительных устройствах натяжения тяговых канатов	+	+			+	
Отсутствие необходимости футеровки приводного шкива		+		+		
Возможность подвески более одного груза к ветви каната					+	+
Возможность жесткой фиксации грузозахватного устройства к канату	+	+	+	+		
Наименьший состав необходимого основного технологического оборудования	+	+			+	

Примечание: «+» - свойство проявляется; «++» - свойство проявляется в наибольшей степени

Таблица 2

Проявление негативных технико-экономических свойств у альтернативных вариантов однопролетных мобильных канатных дорог на базе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов

Наименование свойства	Вариант					
	М-НТк	М-НТл	М-Нл+Тк	М-Нл-Тл	К-НТк	К-Нк+Тк
Невозможность одновременного встречного перемещения грузов		+		+		
Малая ширина груза при встречном перемещении	+		+		+	+
Использование канатов двух типоразмеров			+	+		+
Использование каната максимального типоразмера	+	+			+	
Повышенные длина и вес используемых канатов						+
Необходимость использования канатной лебедки большой емкости		+		+		
Подвеска грузозахватного устройства к одной ветви каната		+		+	+	+
Необходимость использования дополнительных устройствах натяжения тяговых канатов			+	+		+
Необходимость футеровки приводного шкива	+		+		+	+
Наибольшая трудоемкость навешивания канатов			+			++
Необходимость открепляемого закрепления грузозахватного устройства на канате					+	+
Наименьшая надежность основного технологического оборудования			+			++

Примечание: «+» - свойство проявляется; «++» - свойство проявляется в наибольшей степени

3. Ограничение по суммарному весу транспортируемого груза и грузозахватного устройства. Результаты анализа функциональных возможностей мобильных канатных дорог на базе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, представленные в [11], показывают, что предельные значения веса при величинах пролета до 200...300 м и углах наклона трассы до 60° составляют ~ 30...40 кН.

По совокупности положительных и негативных технико-экономических свойств наиболее перспективными для дальнейшей разработки являются мобильные канатные дороги вариантов М-НТк и М-НТл. Для обоих вариантов положительные свойства, в основном, одинаковы, хотя и имеются несоответствия.

Вариант М-НТк оказывается предпочтительнее вследствие возможности реализовать одновременное встречное перемещение грузов, закрепленных на параллельных ветвях

несуще-тяговой канатной системы, а также возможности опирания грузозахватного устройства (при отсутствии встречного перемещения груза) на две ветви несуще-тяговой канатной системы.

Первое преимущество имеет ограниченное практическое значение, так как при диаметре канатных шкивов, который по требованиям компоновки на колесном шасси [12 - 14] может составлять 1,5...2,5 м, допустима лишь малая ширина транспортируемых грузов в диапазоне 1...2 м при условии безветрия во время эксплуатации мобильных канатных дорог.

Второе преимущество имеет большую практическую ценность, так позволяет более эффективно организовать демпфирование раскачивания транспортируемого груза в условиях ветрового воздействия.

Вариант М-НТл оказывается предпочтительнее вследствие более простой регулировки длины каната в зависимости от вели-

чины пролета между базовыми станциями, отсутствия необходимости использования специальных устройств для соединения концов замкнутого каната и отсутствие необходимости использовать футеровку поверхности приводного канатного шкива (лебедки).

Первые два преимущества имеют ограниченное практическое значение, так как при использовании для перемещения груза одной ветви несущего канатной системы излишки длины каната достаточно просто закрепляются на параллельной нерабочей ветви, а современные конструкции устройств соединения концов канатов позволяют обеспечить прочность каната на разрыв в месте его соединения, практически равную агрегатной прочности самого каната. Как показано в [11], отсутствие необходимости в использовании футерованных приводных канатных шкивов (лебедок) является существенным практическим преимуществом, хотя и для варианта М-НТк существуют эффективные конструкторские меры по повышению тягового фактора приводного шкива [15].

Исходя из проведенного сравнительного анализа альтернативных вариантов мобильных канатных дорог в качестве наиболее перспективного и подлежащего дальнейшей научной проработке может быть рекомендован вариант М-НТк – однопролетная одно-

канатная мобильная канатная дорога маятникового типа на базе самоходных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, сопряженных единой несущей канатной системой в виде замкнутого несущего каната с двумя параллельно расположенными ветвями. Типовое конструктивное исполнение данной мобильной канатной дороги показано на рис. 2.

Дополнительно в качестве еще одного перспективного варианта может рассматриваться вариант М-НТл – однопролетная одноканатная мобильная канатная дорога маятникового типа на базе самоходных мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов, сопряженных единой несущей канатной системой в виде закрепленного на синхронно работающих канатных лебедках несущего каната, формирующего одну транспортную ветвь.

#### 4. Типовое конструктивное исполнение и принцип работы варианта М-НТк

Однопролетная мобильная канатная дорога маятникового типа на базе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов (вариант М-НТк) формируется с помощью машинного комплекта, в состав которого входят две автономные базовые стан-

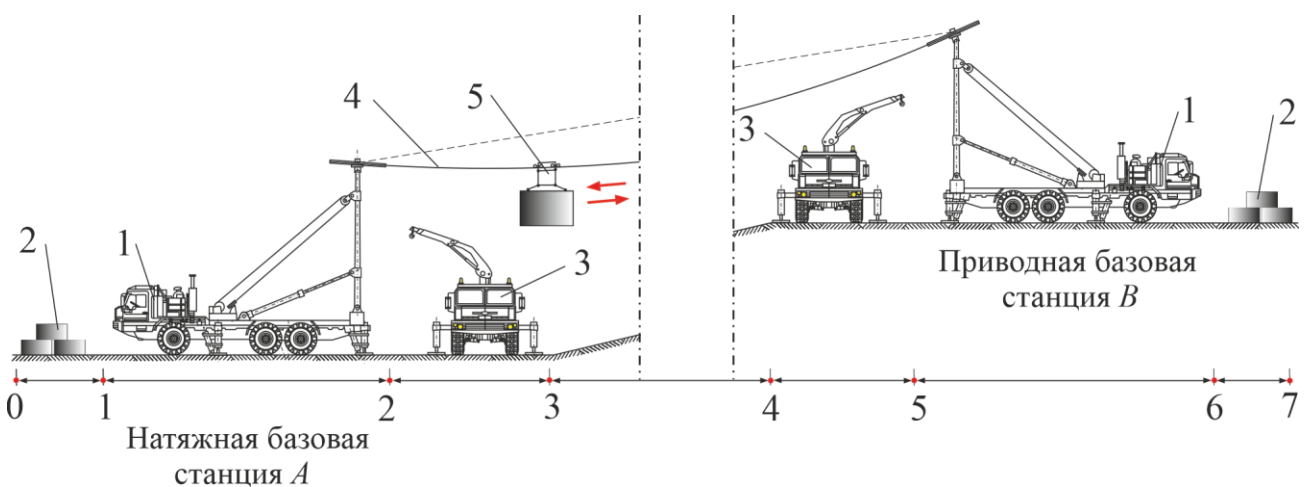


Рис. 2. Типовое конструктивное исполнение однопролетной мобильной канатной дороги маятникового типа на базе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов варианта М-НТк (1 – мобильный транспортно-перегрузочный канатный комплекс; 2 – транспортируемый груз; 3 – кран-манипулятор; 4 – несущий канат; 5 – грузозахватное устройство)

ции, представляющие собой самоходные колесные шасси высокой грузоподъемности и проходимости 1, а также несущее-тяговая канатная система. Базовые станции располагаются на местности в конечных пунктах трассы мобильной канатной дороги (участки 1-2 и 5-6 на рис. 2). Специализированное основное технологическое оборудование, которое монтируется на несущей раме самоходного шасси каждой базовой станции, позволяет обеспечить маятниковое перемещение грузов вдоль трассы мобильной канатной дороги (участок 3-4 на рис. 2) между пунктами погрузки-разгрузки (участки 2-3 и 4-5 на рис. 2). Предварительно транспортируемые грузы 2 доставляются на складскую территорию (участки 0-1 и 6-7 на рис. 2) в непосредственной близости от конечных пунктов трассы мобильной канатной дороги. Затем они с помощью погрузочно-разгрузочных машин, механизмов или приспособлений различных типов (например, мобильных кранов-манипуляторов 3, погрузчиков, конвейеров и др. [16, 17]) подвешиваются к несущее-тяговому канату 4 с помощью грузозахватного устройства 5 различного конструктивного исполнения в зависимости от вида груза. В процессе эксплуатации мобильной канатной дороги одна из базовых станций выполняет функции приводной базовой станции и обеспечивает маятниковое движение несущее-тягового каната с транспортируемым грузом. Вторая базовая станция выполняет функции натяжной базовой станции и обеспечивает оптимальное натяжение несущее-тягового каната в зависимости от длины трассы, перепада высот между конечными точками трассы и веса груза.

Варианты конструктивного исполнения мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов подробно рассмотрены в [10, 12 - 14]. Они имеют сходные конструктивные и эксплуатационные особенности и включают следующие структурно-функциональные элементы:

- концевую опору;
- механизм установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении, обеспечивающий подъем опоры из транспортного положения в рабочее положение для обеспече-

ния требуемого высотного расположения несущее-тяговой канатной системы;

- механизм пространственной ориентации канатного шкива, обеспечивающий взаимную параллельность продольных осей ручья канатного шкива и несущее-тягового каната с учетом естественного провисания каната под нагрузкой во время эксплуатации;

- механизм перемещения несущее-тягового каната, обеспечивающий маятниковое движение транспортируемых грузов;

- механизм натяжения несущее-тягового каната, обеспечивающий оптимальное натяжение каната во время эксплуатации мобильной канатной дороги;

- тормозной механизм, исключающий самопрокидывание концевой опоры [10] при ее переводе из транспортного в рабочее положение;

- дополнительные устройства, механизмы и системы, необходимые с учетом специфических конструктивных особенностей основного технологического оборудования (например, механизм канатной или канатно-гидравлической фиксации концевой опоры, шарнирно-сочлененная штанга механизма подъема и фиксации концевой опоры, механизм предварительного подъема концевой опоры, устройство расчаливания концевой опоры и др. [10]);

- систему управления, обеспечивающую штатную работу и мониторинг всех узлов, устройств и приборов основного технологического оборудования;

- насосную систему для обеспечения работы всех гидравлических приводов и устройств мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса;

- силовую установку для обеспечения работы приводов механизмов мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов;

- самоходное шасси (или прицеп, полуприцеп) для размещения основного технологического оборудования.

Для всех рассмотренных в [10] вариантах конструктивного исполнения мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов на несущей раме самоходного шасси устанавливается основная поддерживающая

конструкции для канатной системы мобильной канатной дороги – концевая опора, а также подъемный гидроцилиндр механизма установки и фиксации концевой опоры в рабочем положении, внешнее тормозное устройство тормозного механизма для предохранения опоры от самопрокидывания при ее подъеме в рабочее положение и механизм натяжения несущего-тягового каната. Концевая опора устанавливается либо непосредственно на несущую раму [12, 13], либо на выносную поворотную платформу [18]. На оголовке концевой опоры закрепляется канатный шкив, а под ним размещаются механизмы перемещения и пространственной ориентации несущего-тягового каната. Концевая опора и подъемный гидроцилиндр, а также концевая опора и механизм натяжения каната кинематически связаны между собой и несущей рамой с помощью цилиндрических шарниров.

К месту разворачивания мобильной канатной дороги оба мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплекса перемещаются автономно, причем концевые опоры в это время находятся в транспортном положении (близком к горизонтальному). На месте расположения каждый мобильный транспортно-перегрузочный канатный комплекс ориентируется таким образом, чтобы продольная ось самоходного шасси совпадала с продольной осью мобильной канатной дороги. Для обеспечения общей устойчивости в условиях действия значительных горизонтальных опрокидывающих нагрузок от силы натяжения несущего-тягового каната и веса транспортируемых грузов самоходные шасси устанавливаются на аутригеры и закрепляются на грунте с помощью дополнительных анкерных устройств [19]. При выдвигении штока подъемного гидроцилиндра концевая опора поворачивается в вертикальной плоскости относительно цилиндрического шарнира, соединяющего ее с несущей рамой, и занимает требуемое рабочее положение (близкое к вертикальному). Для мобильного транспортно-перегрузочного канатного комплекса с выносным расположением концевой опоры поворот относительно цилиндрического шарнира, соединяющего несущую ра-

му с поворотной платформой, приводит к опусканию поворотной платформы на грунт, а затем дальнейший поворот относительно цилиндрического шарнира, соединяющего концевую опору с поворотной платформой, переводит опору в рабочее положение. При эксплуатации мобильной канатной дороги концевая опора в рабочем положении может удерживаться подъемным гидроцилиндром, силовым полиспастом или складывающейся штангой [10]. Для согласования взаимного наклона канатных шкивов сопрягаемых базовых станций, который вызывается естественным провисанием несущего-тягового каната и расположением базовых станций на разных высотах, используется гидравлический механизм пространственной ориентации канатного шкива. Необходимое оптимальное натяжение несущего-тягового каната создается механизмом натяжения одной из базовых станций с помощью входящих к его конструкцию силового полиспаста и натяжной лебедки.

## 5. Заключение

Анализ возможных схемных решений, обеспечивающих получение работоспособной конструкции однопролетной мобильной канатной дороги, сформированной с помощью сопряженных единой несущего-тяговой канатной системой двух мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов на базе автономных самоходных шасси высокой грузоподъемности и проходимости, позволяет установить шесть альтернативных вариантов, каждый из которых обладает определенными положительными и негативными техническими свойствами.

Учитывая специфические требования, связанные с особенностями конструкции и ожидаемых режимов работы однопролетных мобильных канатных дорог на мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексах, в качестве наилучшего варианта был выбран вариант одноканатной мобильной канатной дороги маятникового типа с единой несущего-тяговой канатной системой в виде замкнутого несущего-тягового каната с двумя параллельно расположенными ветвями.

Также было установлено, что перспективным является еще один из альтернативных вариантов - одноканатная мобильная канатная дорога маятникового типа с единой несуще-тяговой канатной системой в виде закрепленного на синхронно работающих канатных лебедках несуще-тягового каната,

формирующего одну транспортную ветвь. Представляют несомненный интерес исследования, направленные на разработку научно обоснованных методов проектирования и моделирования рабочих процессов при эксплуатации указанного варианта мобильной канатной дороги.

### Список литературы

1. 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
2. Дукельский А.И. Подвесные канатные дороги и кабельные краны. М.-Л.: Машиностроение, 1966. 484 с.
3. Scheingert Z. Aerial Ropeways and Funicular Railways. London, 1966. 555 p.
4. Справочник проектировщика промышленных, жилых и гражданских зданий и сооружений. Промышленный транспорт. М.: Стройиздат, 1984. 231 с.
5. Логвинов А.С., Короткий А.А. Пассажирские одноканатные дороги. Устройство и эксплуатация. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2016. 210 с.
6. Короткий А.А. Канатный транспорт (канатные дороги и лифты). Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2018. 114 с.
7. Лагереv А.В., Таричко В.И., Лагереv И.А. Определение оптимальных параметров грузовых подвесных канатных дорог с различной проектной производительностью // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. №10. С. 443-451. DOI: 10.5281/zenodo.355820
8. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Impact of design capacity on optimal parameters of freight aerial mono-cable cableways // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. №378. 012063. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012063
9. Lagerev A.V., Lagerev I.A. Design of Passenger Aerial Ropeway for Urban Environment // Urban Rail Transit. 2019. Vol.5. No.1. P. 17-28. DOI: 10.1007/s40864-018-

### References

1. 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)
2. Dukelskiy A.I. *Podvesnye kanatnye dorogi i kabelnye kраны* [Overhead cableways and cable cranes]. Moscow-Leningrad, Mashinostroenie, 1966. 484 p. (In Russian)
3. Scheingert Z. Aerial Ropeways and Funicular Railways. London, 1966. 555 p.
4. *Spravochnik proektirovshchika. Promyshlennyy transport* [Designer reference. Industrial transport]. Eds. A.S. Gelman, S.D. Chubarov. Moscow, Stroyizdat, 1984. 231 p. (In Russian)
5. Logvinov A.S., Korotkiy A.A. *Passazhirskie odnokanatnye dorogi. Ustroystvo i ekspluatatsiya* [Passenger ropeways with single rope. Device and operation]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2016. 210 p. (In Russian)
6. Korotkiy A.A. *Kanatnyy transport (kanatnye dorogi i lifty)* [Cable transport (cable cars and elevators)]. Rostov-na-Donu, DGTU, 2018. 114 p. (In Russian)
7. Lagerev A.V., Tarichko V.I., Lagerev I.A. Determination of optimal parameters of freight aerial ropeway for various design capacity. *Izvestiya Tulskego gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2019, No. 10, pp. 443-451. DOI: 10.5281/zenodo.355820 (In Russian)
8. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Impact of design capacity on optimal parameters of freight aerial mono-cable cable-

0099-z

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

11. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Надежность и безопасность эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов. Брянск: РИСО БГУ, 2022. 207 с.

12. 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

13. Лагерев А.В., Таричко В.И., Лагерев И.А. Обеспечение вертикального габарита самоходной машины со штанговым механизмом установки и фиксации концевой опоры для мобильной канатной дороги // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2021. №2. С. 141-152. DOI: 10.22281/2413-9920-2020-07-02-141-152

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

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

16. Таричко В.И., Лагерев И.А. Концепция создания мобильных канатных дорог на базе специальных колесных шасси // Материалы Материалы Всеросс. научно-

ways. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 378 (2019) 012063. DOI: 10.1088/1755-1315/378/1/012063

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

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

11. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. *Nadezhnost i bezopasnost ekspluatatsii mobilnykh transportno-peregruzochnykh kanatnykh kompleksov* [Reliability and safety of operation of mobile transport and overloading rope complexes]. Bryansk, RISO BGU, 2022. 207 p. (In Russian)

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

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

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

15. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Determination of tension forces of ropes during the operation of mobile transport and

практич. конф. «Инновационное развитие подъемно-транспортной техники». Брянск: БГТУ, 2019. С. 84-87.

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

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

19. Лагерев А.В., Таричко В.И., Солдатов С.П. Обеспечение общей устойчивости базовых колесных станций мобильных канатных дорог // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2019. №2. С. 210-220. DOI: 10.22281/2413-9920-2019-05-02-209-220

reloading rope complexes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.3, pp. 194-210. DOI: 10.22281/2413-9920-2022-08-03-194-210 (In Russian)

16. 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)

17. 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)

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

19. 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)



УДК (UDC) 621.86

ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ОПОРЫ АНКЕРНОГО КАНАТА МАШИНЫ  
ДЛЯ ЛЕСОЗАГОТОВКИ НА СКЛОНЕTHE STRENGTH ASSESSMENT OF THE ANCHOR ROPE SUPPORT  
OF THE MACHINE FOR LOGGING ON THE SLOPEХимич А.В.  
Khimich A.V.Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Россия)  
Academician I.G. Petrovskii Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

**Аннотация.** В статье представлена методика расчета взаимодействия опоры и анкерного каната машины для лесозаготовки на склоне. Рассмотрены случаи использования в качестве опоры отдельно стоящего дерева и стальной двутавровой балки, вертикально забиваемой в грунт. Расчеты выполнены с помощью аналитических зависимостей, а также методом конечных элементов.

**Ключевые слова:** машина для лесозаготовки, склон, опора, дерево, балка, анкерный канат.

**Дата принятия к публикации:** 25.01.2023  
**Дата публикации:** 25.03.2023

**Сведения об авторах:**

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

**Abstract.** The article presents a method for calculating the interaction of a support and an anchor rope of a logging machine on a slope. The cases of using a free-standing tree and a steel I-beam vertically driven into the ground as a support are considered. Calculations are performed using analytical dependencies, as well as the finite element method.

**Keywords:** logging machine, slope, support, tree, beam, anchor rope.

**Date of acceptance for publication:** 25.01.2023  
**Date of publication:** 25.03.2023

**Author's information:**

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

**Благодарности**

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

**Acknowledgements**

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

**1. Введение**

В Российской Федерации значительные площади спелого древостоя сосредоточены на территориях с плотным наличием резко пересеченного рельефа и крутых склонов (с продольным наклоном 30 и более градусов), которые в нижней своей части часто соприкасаются с гидрологическими системами (болотами, речками) [1].

Для заготовки древесины в таких зонах не подходят стандартные машины (харвестеры, форвардеры) в базовой комплектации, так как они не могут устойчиво передвигаться вдоль крутых склонов. Поэтому они дора-

батываются путем установки лебедки, с помощью которой можно обеспечить закрепление машины на склоне с помощью анкерного каната (рис. 1) [2].

Машины для лесозаготовки на склонах также оснащаются специальными системами управления, использующими цифровые двойники, которые позволяют оперативно реагировать на различные изменения оперативной обстановки и своевременно предотвращать потерю устойчивости и другие аварийные ситуации [3-5].



Рис. 1. Машина для лесозаготовки на склоне, оборудованная лебедкой

## 2. Исследование взаимодействия дерева и анкерного каната

В общем случае (рис. 2) нагрузка со стороны анкерного каната  $P_w$  (Н) приложена к дереву в точке А под углом  $\alpha_w$  на высоте  $L_1$  (м) от основания дерева (точка О). Общая высота дерева –  $L_0$  (м). Диаметр ствола дерева  $d_w$  (м) можно считать постоянным, но в общем случае он переменен по высоте –  $d_w = d_w(x)$ . Таким образом, в расчетах дерево считается упругим стержнем ОВ переменного сечения.

При исследовании динамических процессов жесткость дерева определяется модулем упругости  $E_w$  (Па) и геометрическими характеристиками, переменными по высоте.

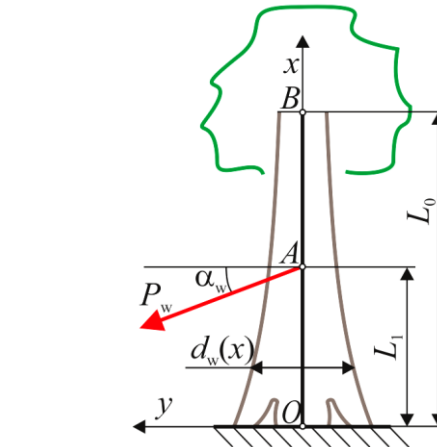


Рис. 2. Расчетная схема взаимодействия дерева и анкерного каната при оценке статической прочности

При исследовании динамических процессов жесткость дерева определяется модулем упругости  $E_w$  (Па) и геометрическими характеристиками, переменными по высоте.

Угол  $\alpha_w$  зависит от параметров размещения опоры, лесозаготовительной машины и угла продольного наклона  $\alpha_s$  склона. Расчетная схема определения угла показана на рис. 3.

Угол  $\alpha_w$  можно вычислить следующим образом:

$$\alpha_w = \arctg\left(\operatorname{tg}(\alpha_s) + \frac{L_1 - H_{\text{mls}}}{L_{\text{mls}}}\right), \quad (1)$$

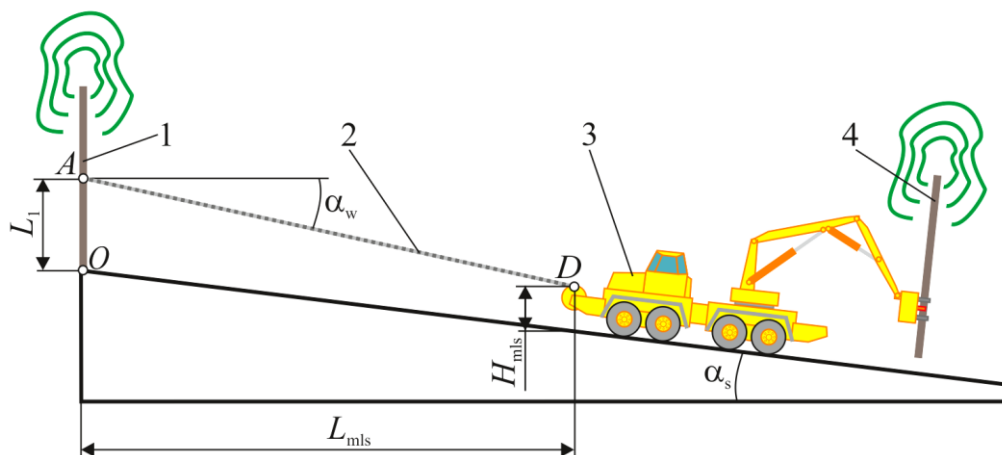


Рис. 3 – Расчетная схема определения угла приложения нагрузки к дереву  $\alpha_w$  :

- 1 – дерево, за которое крепится анкерный канат; 2 – анкерный канат;  
 3 – машина для лесозаготовки на склоне; 4 – спиленное дерево

где  $L_{m/s}$  – горизонтальное расстояние от точки крепления каната до дерева, за которое закреплен анкерный канат, м;  $H_{m/s}$  – высота от поверхности склона до точки схода каната с лебедки, м.

График угла приложения каната согласно формуле (1) при различных параметрах системы показан на рис. 4.

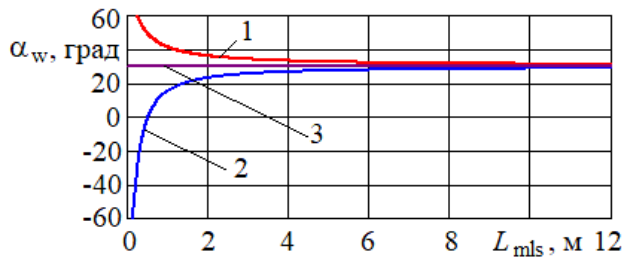


Рис. 4 – Значения угла приложения нагрузки к дереву  $\alpha_w$  при  $\alpha_s = 30^\circ$ : 1 –  $L_1 = 1,5$  м,  $H_{m/s} = 1,2$  м; 2 –  $L_1 = 1,2$  м,  $H_{m/s} = 1,5$  м; 3 –  $L_1 = H_{m/s} = 1,2$  м

Из графика (рис. 4) следует, что угол приложения нагрузки существенно меняется вблизи дерева, за которое закреплен анкерный канат. С ростом расстояния  $L_{m/s}$  величина угла  $\alpha_w$  стремится к величине угла  $\alpha_s$ . При  $L_{m/s} = L_1$  угол каната равен углу склона. При  $L_{m/s} < L_1$  угол каната всегда положителен и усилие каната вызывает совместный изгиб и сжатие дерева, за которое закреплен анкерный канат. При  $L_{m/s} > L_1$  угол каната положителен, пока  $L_{m/s} > (H_{m/s} - L_1) \cdot \operatorname{tg}^{-1} \alpha_s$  и усилие каната вызывает совместный изгиб и сжатие дерева, за которое закреплен анкерный канат. Когда  $L_{m/s} = (H_{m/s} - L_1) \cdot \operatorname{tg}^{-1} \alpha_s$  угол каната  $\alpha_w$  становится равным нулю. При дальнейшем перемещении машины и уменьшении  $L_{m/s}$  угол каната становится отрицательным, и усилие каната вызывает совместный изгиб и растяжение дерева, за которое закреплен анкерный канат.

Следует отметить, что для реальных соотношений размеров данный эффект наблюдается только при очень близком подходе машины к дереву (на 0,5 м и менее). Такая

ситуация при реальном соотношении размеров маловероятна.

Механические напряжения, действующие в сечении дерева, определяемом координатой  $x$ :

$$\sigma_w(x) = \frac{4k_{Pw}P_w \sin \alpha_w}{\pi d_w^2(x)} + \frac{16P_w \cos \alpha_w (L_1 - x)}{\pi d_w^3(x)}, \quad (2)$$

где  $k_{Pw}$  – коэффициент передачи усилия, учитывающий возможность не плотного закрепления анкерного каната не плотно закреплена на дереве (при плотном закреплении  $k_{Pw} = 1$ ).

Предельно допустимую величину усилия  $[P_w]$  можно вычислить из условия

$$\max(\sigma_w(x)) \leq [\sigma_w], \quad (3)$$

где  $[\sigma_w]$  – допускаемые напряжения, Па, определяемые для каждого сорта древесины следующим образом:

$$[\sigma_w] = \sigma_{wb} / k_{\sigma w}, \quad (4)$$

где  $k_{\sigma w}$  – коэффициент запаса, принимаемый равным 3,5...4;  $\sigma_{wb}$  – предел прочности древесины при заданной влажности, Па (определяется на основе эксперимента).

На месте проведения работ произрастают деревья известного диаметра. Для удобства расчетов для промышленной древесины можно считать  $d_w(x) = \text{const}$ . Тогда значение предельно допустимого усилия  $[P_w]$  согласно выражению (2) можно вычислить по следующей формуле:

$$[P_w] = \frac{[\sigma_w]}{\frac{4k_{Pw} \sin \alpha_w}{\pi d_w^2} + \frac{16 \cos \alpha_w (L_1 - x)}{\pi d_w^3}} \quad (5)$$

Выражения (2) и (5) справедливы, если считать материал дерева изотропным. На самом деле, пределы прочности древесины при растяжении-сжатии и изгибе различны. В этом случае необходимо отдельно рассматривать сжатие и изгиб дерева, за которое закреплен анкерный канат.

В дереве, используемом в качестве опоры анкерного каната, действуют напряжения сжатия  $\sigma_{wx}$  и изгиба  $\sigma_{wy}$ :

$$\sigma_{wx}(x) = \frac{4k_{Pw}P_w \sin \alpha_w}{\pi d_w^2(x)},$$

$$\sigma_{wy}(x) = \frac{16P_w \cos \alpha_w (L_1 - x)}{\pi d_w^3(x)}. \quad (6)$$

Прочность дерева считается обеспеченной, если отдельно выполнены условия прочности при растяжении-сжатии, а также условие (3):

$$\sqrt{\sigma_{wx}^2(x) + \sigma_{wy}^2(x)} \leq \sqrt{[\sigma_{wx}]^2 + [\sigma_{wy}]^2}, \quad (7)$$

где  $[\sigma_{wx}]$  – допускаемые напряжения при растяжении-сжатии дерева, Па;  $[\sigma_{wy}]$  – допускаемые напряжения при изгибе дерева, Па.

Допускаемые напряжения в выражении (7) определяются по формуле (4) в зависимости от предела выносливости при растяжении-сжатии  $\sigma_{wxb}$  (Па) и при изгибе  $\sigma_{wyb}$  (Па). Таким образом, для оценки прочности используются эквивалентные напряжения при многоосном (двухосном) напряженно-деформированном состоянии. Значения пределов прочности, принятые при расчетах в ходе исследования, приведены в табл. 1.

$$[P_w] = \min \left( \frac{[\sigma_{wx}]}{\frac{4k_{pw} \sin \alpha_w}{\pi d_w^2}}, \frac{[\sigma_{wy}]}{\frac{16 \cos \alpha_w (L_1 - x)}{\pi d_w^3}}, \frac{[\sigma_w]}{\frac{4k_{pw} \sin \alpha_w}{\pi d_w^2} + \frac{16 \cos \alpha_w (L_1 - x)}{\pi d_w^3}} \right). \quad (8)$$

Величина предельно допустимого значения усилия  $[P_w]$  согласно выражениям (3) и (8) в зависимости от угла приложения  $\alpha_w$  и диаметра  $d_w$  приведены на графиках, представленных на рис. 5. В расчетах было принято:  $k_{\sigma w} = 3,5$ ,  $k_{P_w} = 1$ .

Анализ графиков, показанных на рис. 5, показывает, что минимальное значение предельно допустимого усилия получается согласно формуле (5). С ростом характеристик прочности древесины (пределов сопротивления) закономерно растет величина предельно допустимого усилия.

С ростом угла наклона каната  $\alpha_w$  предельно допустимое усилие повышается, так как увеличивается доля нагрузки, вызывающее сжатие. Несмотря на более низкий предел прочности древесины на сжатие, более важными оказываются значения геометрических параметров сечения дерева.

Таблица 1

Пределы выносливости основных пород древесины в зонах промышленной лесозаготовки при влажности древесины 12-15% [2]

Порода дерева	Предел сопротивления, МПа		
	При растяжении-сжатии $[\sigma_{wx}]$	При изгибе $[\sigma_{wy}]$	Для выражения (4)
Сосна	43,9	79,3	79,3
Береза	44,7	99,7	99,7
Осина	37,4	76,6	76,6

Величину предельно допустимого значения усилия  $[P_w]$ , действующего на дерево со стороны анкерного каната согласно выражениям (6) можно вычислить по следующей формуле:

Так как средний диаметр деревьев в типичной зоне лесозаготовки лежит в пределах 0,2-0,3 м, то предельно допустимое усилие при углах склона от  $30^\circ$  составляет 10...12 кН, что позволяет выдерживать нагрузки, действующие со стороны лесозаготовительных машин.

### 3. Исследование взаимодействия двутавровой балки и анкерного каната

Анкерный канат может закрепляться за дерево. Также в качестве опоры возможно использовать стальную балку, вертикально забиваемую в грунт перед началом работы машины для лесозаготовки на склоне. Общая схема такого решения показана на рис. 6.

Конструкция (рис. 6) работает следующим образом. Стальная балка 1 изготовлена из двутавра и с одного конца имеет срез под углом  $45^\circ$ , что облегчает ее погружение в

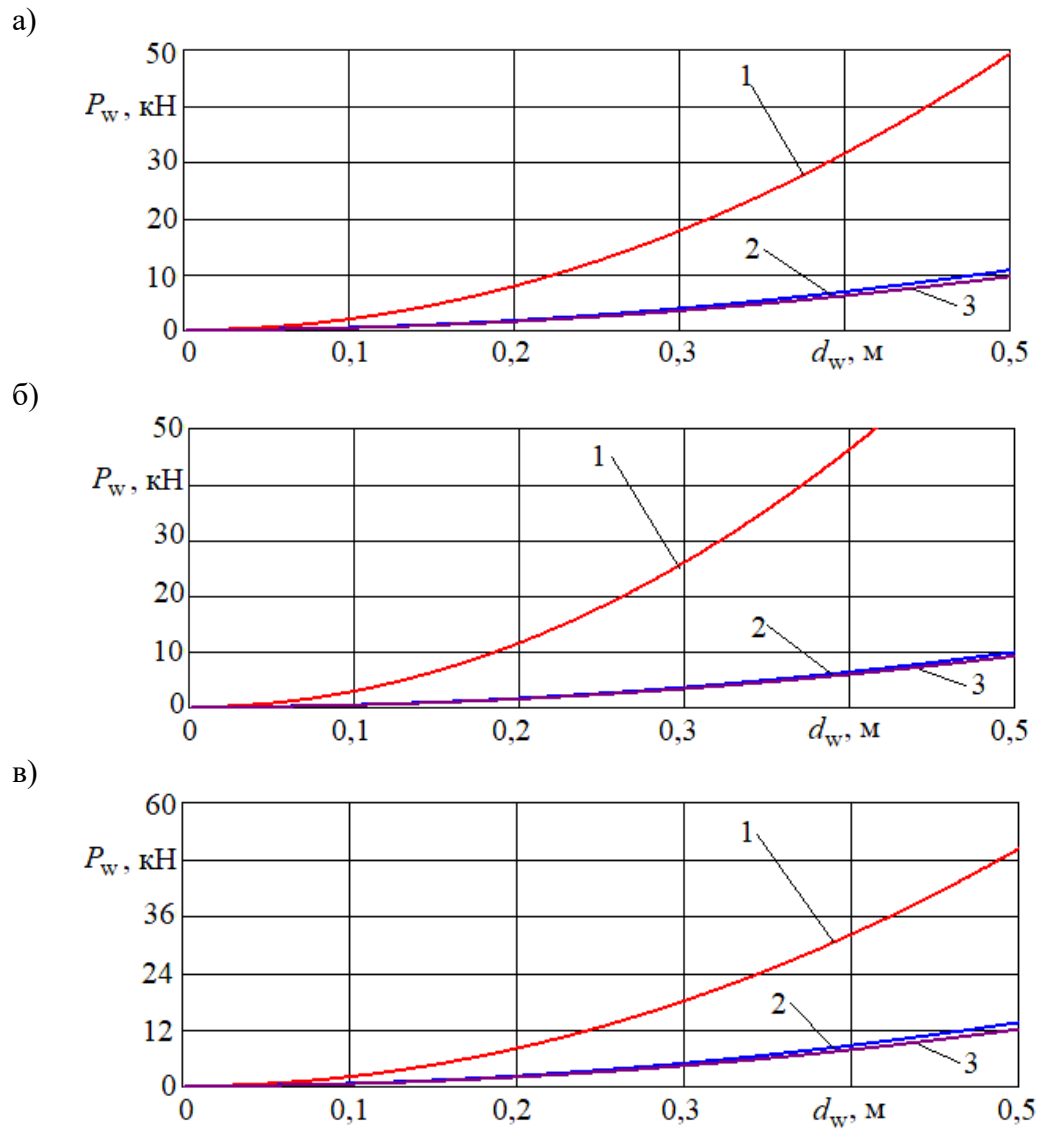


Рис. 5. Предельно допустимое усилие [ $P_w$ ] для сосны в зависимости от диаметра дерева  $d_w$ : а –  $\alpha_w = 30^\circ$ ; сосна; б –  $\alpha_w = 20^\circ$ , сосна; в –  $\alpha_w = 30^\circ$ , береза (1 – допустимое усилие при растяжении-сжатии; 2 – допустимое усилие при изгибе; 3 – допустимое усилие по выражению (5))

грунт. В верхней части балки сделано отверстие, в которое вставлен болт 2, удерживающий хомут 3. Для выравнивания болта 2 и выравнивания нагрузки внутри таврового сечения с двух сторон установлены втулки 4. На болт накручена корончатая гайка 5, закрепленная штифтом 6. Под головку болта и гайку подложены шайбы 7. Анкерный канат 8 огибает хомут 3 и закрепляется зажимом 9. Таким образом, формируется шарнирное соединение, позволяющее анкерному канату от-

клоняться в вертикальной и горизонтальной плоскостях.

Расчетная схема формирования силы реакции при внедрении опоры в виде балки в грунт показана на рис. 7. После начала нагружения опоры грунт деформируется [6], и внутри расширившегося отверстия балка поворачивается относительно точки  $O$ . Таким образом, взаимодействие опоры анкерного каната с грунтом происходит частично по передним, частично по задним поверхностям.

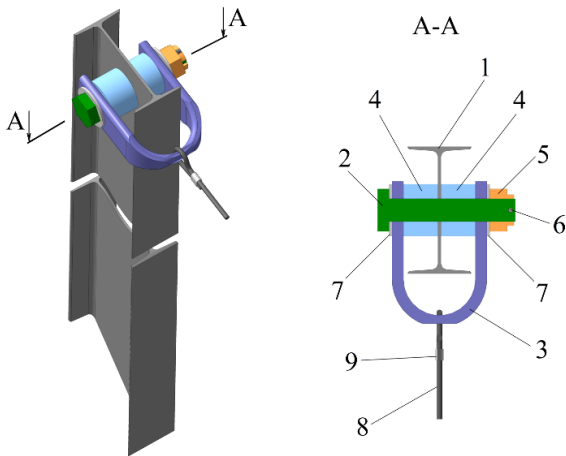


Рис. 6. Конструкция стальной балки для крепления анкерного каната:

- 1 – стальная двутавровая балка; 2 – болт;  
 3 – хомут; 4 – втулка; 5 – корончатая гайка;  
 6 – штифт; 7 – шайба; 8 – анкерный канат;  
 9 – зажим каната

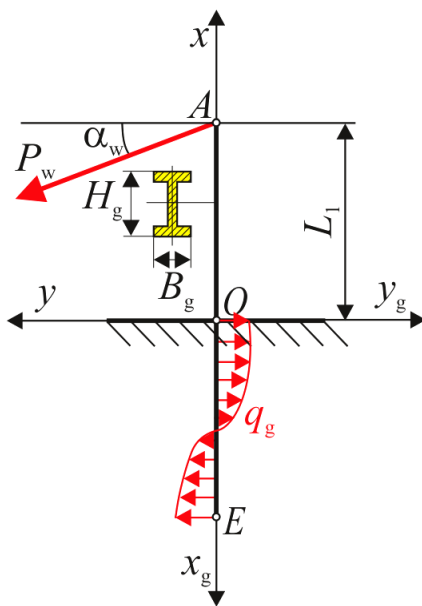


Рис.7. Расчетная схема

Интенсивность распределенных реакций грунта  $q_g$  (Н/м) не может быть постоянной и может быть задана линейным законом  $q_g = a_{0g}x_g + b_{0g}$ . Коэффициенты  $a_{0g}$  и  $b_{0g}$  можно вычислить, решив систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{L_g^2}{2} a_{0g} + L_g b_{0g} = P_w \cos \alpha_w, \\ \frac{L_g^3}{6} a_{0g} + \frac{L_g^2}{2} b_{0g} = P_w \cos \alpha_w L_1, \end{cases}$$

где  $P_w$  – усилие натяжения анкерного каната, Н;  $L_g$  – глубина внедрения опоры в грунт, м;  $L_1$  – высота опоры (точки крепления анкерного каната над поверхностью грунта), м;  $\alpha_w$  – угол наклона анкерного каната, град.

Решив систему уравнений, получим

$$a_{0g} = \frac{-12P_w \cos \alpha_w (L_1 - 0,5L_g)}{L_g^3},$$

$$b_{0g} = \frac{P_w \cos \alpha_w}{L_g} + \frac{6P_w \cos \alpha_w (L_1 - 0,5L_g)}{L_g^2}.$$

Значение предельно допустимого значения усилия  $[P_w]$  можно вычислить по следующей формуле:

$$[P_w] = [R_0] \left( k_{R0} \cos \alpha_w \left( \frac{1,5L_g - L_1}{L_g B_g} \right) \right)^{-1},$$

где  $B_g$  – ширина опоры, м;  $[R_0]$  – несущая способность грунта, Па;  $k_{R0}$  – коэффициент запаса по несущей способности грунта.

Решив обратную задачу, можно оценить требуемую глубину заглубления  $[L_g]$  опоры в грунт при заданной величине усилия  $P_w$ , решив квадратное уравнение:

$$R_0 B_g^{-1} L_g^2 - 1,5 k_{R0} P_w \cos \alpha_w L_g + k_{R0} P_w \cos \alpha_w L_1 = 0.$$

Значения предельно допустимого значения усилия  $[P_w]$  в зависимости от угла приложения  $\alpha_w$  приведены на графике (рис. 8). В расчетах было принято:  $L_1 = 1,2$  м,  $L_g = 1,2$  м,  $k_{R0} = 1,4$ ,  $B_g = 0,11$  м (двутавр № 22).

Анализ графика (рис. 8) показывает, что предельно допустимое усилие возрастает в 2...4 раза по сравнению с закреплением за дерево. В целом, использование стальной балки для закрепления машины на склоне является более эффективным.

В рамках исследования разработана методика расчета стальной балки, вертикально забиваемой в грунт, методом конечных элементов с учетом влияния грунта согласно рекомендациям [6-8]. Расчетная схема и конечноэлементная модель показана рис. 9.

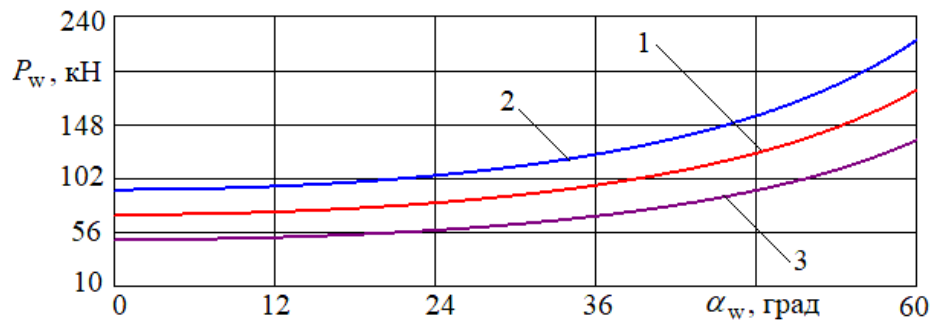


Рис. 8. Предельно допустимое усилие [ $P_w$ ] в зависимости от типа грунта и угла  $\alpha_w$ : 1 – крупный песок; 2 – глина; 3 – гравий с глиной

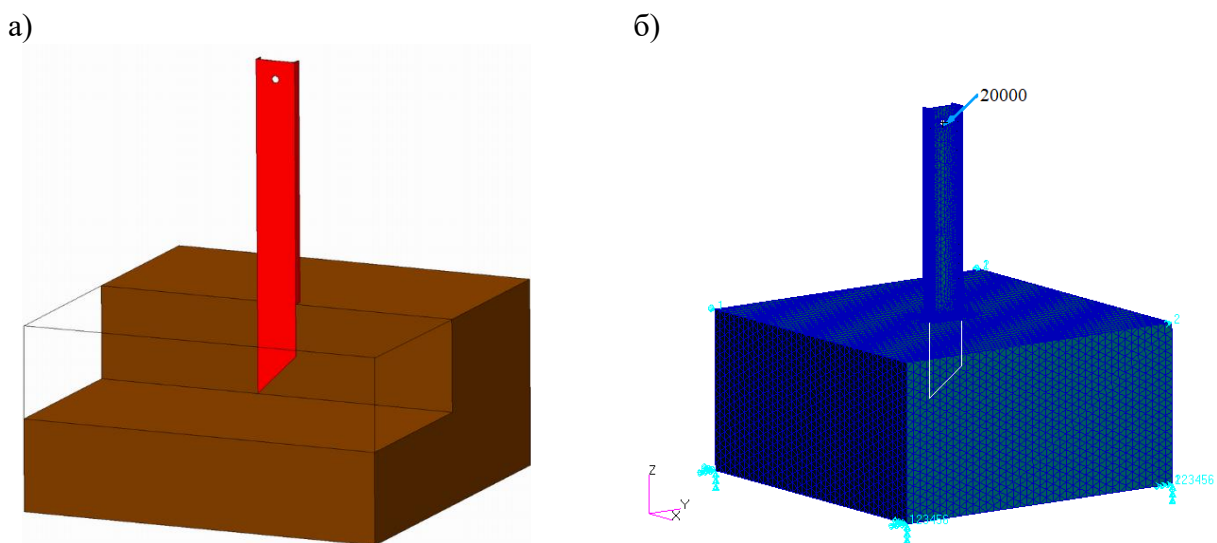


Рис. 9. Расчетная модель стальной балки: а – трехмерная модель (материал грунта частично не показан); б – конечноэлементная модель (конечные элементы хвостовой части балки внедрены в грунт, приложено усилие и закрепления)

При моделировании нижняя поверхность грунта закреплялась по всем направлениям. Боковые поверхности грунта закреплялись вдоль перпендикулярных осей. Усилие  $P_w$  прикладывалось в виде двух компонент сосредоточенной силы (горизонтальной и вертикальной). Представленная на рис. 9, б конечноэлементная модель содержит 675353 объемных конечных элементов в форме тетраэдра с 2065866 степенями свободы. Время расчета составило 85 мин.

Моделирование выполнено для случая  $P_w=20$  кН,  $\alpha_w=30^\circ$ ,  $L_1=1,2$  м,  $L_g=0,5$  м, балка – двутавр № 22. Тестовые расчеты выполнены для грунта типа «Крупный песок». Модули упругости стали  $2,1 \cdot 10^{11}$  Па, коэф-

фициент Пуассона 0,3. Модули упругости грунта  $30 \cdot 10^6$  Па, коэффициент Пуассона 0,5. Результаты расчета суммарных перемещений в системе с глинистым основанием показаны на рис. 10 и рис. 11.

#### 4. Основные выводы

1. Средний диаметр деревьев в типичной зоне лесозаготовки (0,2...0,3 м) позволяет обеспечить надежное удержание машины для лесозаготовки на склоне, так как обеспечивается предельная величина усилия на опоре 10-12 кН.

2. Использование стальной двутавровой балки для закрепления машины на склоне является более эффективным, так как позво-

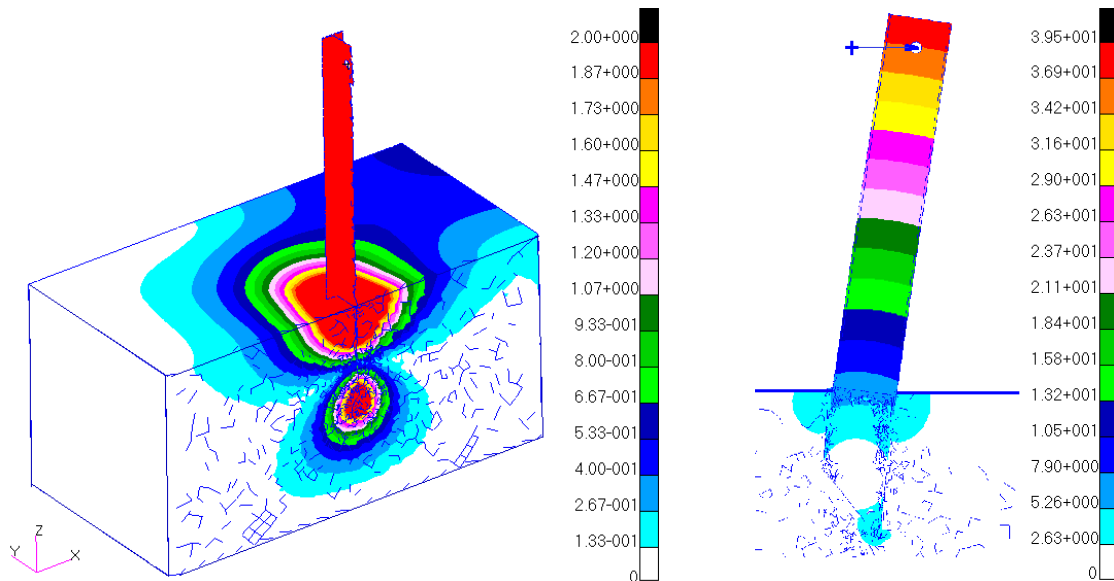


Рис. 10. Суммарные перемещения, мм

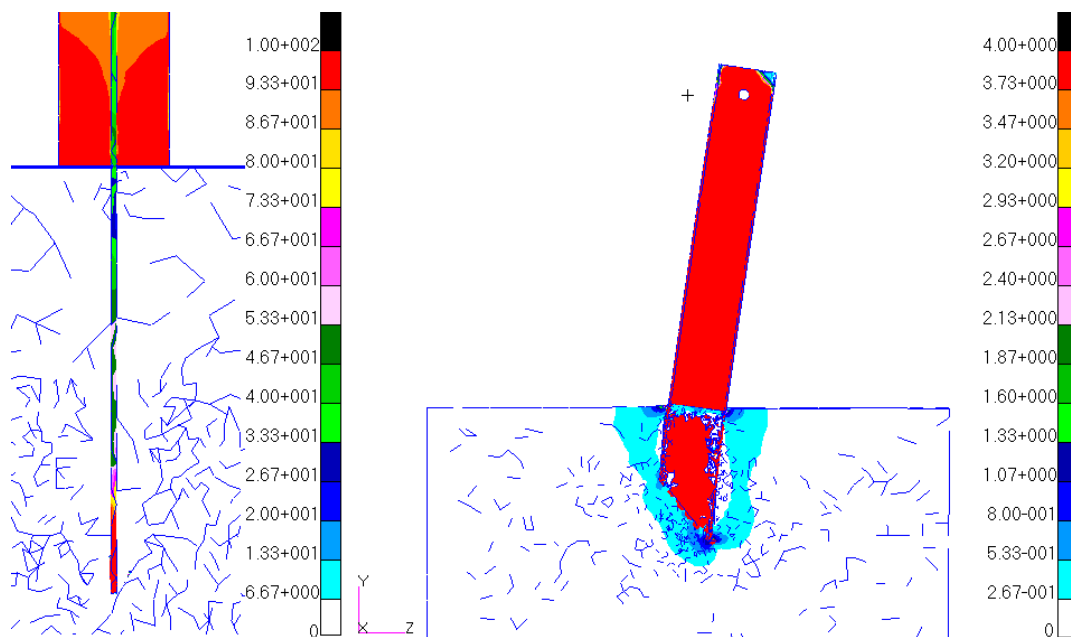


Рис. 11. Эквивалентные напряжения, МПа

ляет выдерживать в 2-4 раза большие нагрузки, чем отдельно стоящее дерево.

3. Максимальные перемещения точки крепления анкерного каната для опоры в ви-

де балки при деформации грунта составляют 40 мм, а давление на грунт по передней кромке стальной балки 267...450 МПа, что соответствует несущей способности грунтов и аналитическому решению.

### Список литературы

1. Григорьев И., Куницкая О., Рудов С., Каляшов В., Тамби А. Лесозаготовительные машины для работы на склонах // Бюллетень ассоциации «Лестех». 2020. № 1. С. 4-9.

### References

1. Grigoriev I., Kunitzskaya O., Rudov S., Kalyashov V., Tambi A. Logging machines for working on slopes. *Bulletin of the Lestekh association*, 2020, No.1, pp. 4-9. (In Russian)



2. Химич А.В., Лагерев И.А. Исследование динамической нагруженности мобильной канатной транспортно-технологической машины, размещенной на склоне // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №2. С. 159-164.

3. Лагерев А.В., Лагерев И.А. Общий подход к созданию цифровых двойников мобильных канатных дорог на основе мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №1. С. 38-60.

4. Лагерев А.В., Лагерев И.А., Таричко В.И. Определение усилий натяжения канатов при эксплуатации мобильных транспортно-перегрузочных канатных комплексов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №3. С. 194-210.

5. Лагерев А.В. Моделирование работы гидропривода механизма установки концевой опоры на самоходном шасси мобильной канатной дороги // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2022. №2. С. 110-124.

6. Лагерев 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.

7. Лагерев И.А. Моделирование рабочих процессов манипуляционных систем мобильных многоцелевых транспортно-технологических машин и комплексов. Брянск: РИО БГУ, 2016. 371 с.

8. Лагерев И.А. Динамическая нагруженность крана-манипулятора машины для сварки трубопроводов при движении с грузом // Подъемно-транспортное дело. 2011. №3. С. 7-9.

2. Khimich A.V., Lagerev I.A. Investigation of the dynamic loading of a mobile rope transport-technological machine located on a slope. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 159-164. (In Russian)

3. Lagerev A.V., Lagerev I.A. General approach to the creation of digital twins of mobile ropeways based on mobile transport and handling rope complexes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.1, pp. 38-60. (In Russian)

4. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Tarichko V.I. Determination of rope tension forces during the operation of mobile transport-handling rope complexes. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.3, pp. 194-210. (In Russian)

5. Lagerev A.V. Modeling of the operation of the hydraulic drive of the mechanism for installing the end support on a self-propelled chassis of a mobile cable car. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2022, No.2, pp. 110-124. (In Russian)

6. Lagerev I.A., Ostroukhov I.O., Khimich A.V. Computer simulation of the process of loss of overall stability of a mobile machine equipped with a boom handling system. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2019, No.1, pp. 83-94. (In Russian)

7. Lagerev I.A. Modeling of work processes of manipulation systems of mobile multi-purpose transport-technological machines and complexes: monograph. Bryansk, RIO BGU, 2016. 371 p. (In Russian)

8. Lagerev I.A. Dynamic loading of a crane-manipulator of a machine for welding pipelines when moving with a load. *Podemno-transportnoe delo*, 2011, No.3, pp. 7-9. (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> 25.03.2023 г.