

УДК (UDC) 621.873

К ВОПРОСУ О КОНТРОЛЕ ФАКТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ ПАССАЖИРСКИХ КАНАТНЫХ ДОРОГON THE ISSUE OF MONITORING THE ACTUAL CONDITION OF STEEL ROPES
OF PASSENGER CABLE CARSКороткий А.А., Иванов Б.Ф., Панфилова Э.А.
Korotkiy A.A., Ivanov B.F., Panfilova E.A.Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Россия)
Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Аннотация. Рассмотрены наиболее распространенные виды дефектов стальных канатов, возникающих при эксплуатации пассажирских канатных дорог, а также причины их возникновения. Проведен анализ геометрических параметров и структуры стального каната с имеющимся дефектом «волнистость», построена компьютерная 3D-модель с использованием видеоаналитики. Рассмотрен оптический метод обнаружения поверхностных дефектов стальных канатов на базе машинного зрения и искусственного интеллекта для дистанционного непрерывного мониторинга его технического состояния.

Ключевые слова: пассажирские канатные дороги, обеспечение безопасности, видеоаналитика, нейронная сеть, стальные канаты.

Дата получения статьи: 20.01.2025
Дата принятия к публикации: 03.03.2025
Дата публикации: 25.03.2025

Сведения об авторах:

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9446-4911>

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9080-5520>

Панфилова Эльвира Анатольевна – кандидат философских наук, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», e-mail: korotkaya_elvira@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8485-5983>

Abstract. The most common types of defects in steel ropes that occur during the operation of passenger cable cars, as well as the causes of their occurrence, are considered. The geometric parameters and structure of a steel rope with an existing "undulation" defect are analyzed, and a 3D computer model using video analytics is constructed. An optical method for detecting surface defects in steel ropes based on machine vision and artificial intelligence for remote continuous monitoring of its technical condition is considered.

Keywords: passenger cable cars, ensuring security, video analytics, neural network, steel ropes.

Date of manuscript reception: 20.01.2025
Date of acceptance for publication: 03.03.2025
Date of publication: 25.03.2025

Authors' information:

Anatoly A. Korotkiy - Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Department "Operation of Transport Systems and Logistics" at Don State Technical University, e-mail: korot@novoch.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9446-4911>

Boris F. Ivanov - Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Center for Scientific Communications at Don State Technical University, e-mail: ivanov@ikc-mysl.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9080-5520>

Elvira A. Panfilova – Cand. Sci. (Phil.), Associate Professor of the Operation of transport systems and logistics Department at Don State Technical University, e-mail: korotkaya_elvira@mail.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8485-5983>

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Фонда содействия инновациям), проект 57ГРЦЭИИС12-D7/79071

Acknowledgements

The study was supported by the grant of The Fund for Assistance to the Development of Small Forms of Enterprises in the Scientific and Technical Sphere (Innovation Promotion Fund), project No. 57GRCEIIS12-D7/79071

1. Введение

Современный научно-технический уровень развития отечественных пассажирских канатных дорог предъявляет все более высокие требования к обеспечению безопасности при эксплуатации канатных дорог, и, соответственно, к надежности и качеству наиболее ответственного элемента этих устройств - стального каната. Согласно статистике по открытым источникам информации не менее 25 % аварий и несчастных случаев на пассажирских канатных дорогах обусловлены выходом из строя стальных канатов [1].

Критерии и нормы браковки несущих, тяговых, тяговых, натяжных и других круглопрядных канатов двойной свивки, эксплуатирующихся на пассажирских канатных дорогах, описание дефектов, природа их образования, в достаточной мере представлены в нормативной и технической литературе [2-6]. Из всего многообразия возможных наиболее часто встречающихся дефектов на канатах пассажирских канатных дорог являются: обрывы наружных проволок, их поверхностный износ и коррозия, деформационные дефекты, местное увеличение или уменьшение диаметра каната, деформационные дефекты («волнистость», выдавливание проволок, «корзинообразность» или отслоение прядей), а также повреждения в результате температурных воздействий.

В связи с тем, что обрывы наружных проволок связаны с процессами многоциклового усталостного разрушения металла канатной проволоки, образованием макротрещин протяженностью 0,5...1,0 мм с последующим обрывом при статистической (усредненной) нагрузке от 50 000 циклов при совокупном влиянии изгибных напряжений, растяжения – сжатия и кручения каната, важным является своевременное обнаружение дефектного участка с имеющимися браковочными показателями по обрывам проволок.

Поверхностный износ наружных проволок, как и их коррозия, также является дефектом, способствующим потере наружного

сечения каната и, соответственно, его несущей способности. Интенсивность износа увеличивается в соответствии с техническим состоянием футеровки шкивов и бандажей роликов пассажирских канатных дорог.

Причины появления дефектов «уменьшение (или увеличение) диаметра круглопрядного на 10 %» носят либо деформационный характер, но могут возникнуть в результате климатических воздействий (при «разбухании» под действием влаги и низких температур органического сердечника или его разрыве).

Повреждение каната в результате воздействия электрического дугового разряда, а также удара молнии приводит к нарушению прочностных свойств материала проволок, структуры каната и выгоранию смазки сердечника.

Одним из наиболее опасных дефектов является «волнистость», который может возникнуть как по длине, так и в месте срачивания несущего-тягового или тягового каната и привести к его обрыву, а, следовательно, к аварии на пассажирских канатных дорогах.

Причины возникновения винтообразной деформации стального каната в виде штопора исследовались многими учеными: М.Ф. Глушко и С.Т. Сергеев объясняли возникновение этого дефекта переходными процессами, связанными с изгибом каната, М.Н. Хальфин обуславливал появление «волнистости» неравномерностью натяжения элементов каната при изготовлении из-за различий геометрических параметров и физико-механических характеристик канатной проволоки. Малиновский В.А. считал одной из причин формирования винтообразной деформации несимметричное растяжение каната в процессе эксплуатации.

2. Постановка задачи

Одним из важных критериев надежной и безопасной работы каната является обеспечение равномерного распределения действующих нагрузок между его прядями и про-

волокнами в слоях прядей как в процессе изготовления, монтажа, так и при эксплуатации, что в настоящее время достаточно сложно. Кроме этого, отсутствуют методы расчета напряженно-деформированного состояния, учитывающие механизм образования деформационных дефектов и их влияние на долговечность стальных канатов.

Неравномерное нагружение проволок и прядей стального каната, вызванные различием геометрических параметров и механических характеристик при изготовлении и эксплуатации, а также кинематическое кручение стального каната относительно своей оси способствует формированию дефекта «волнистость» (рис.1).

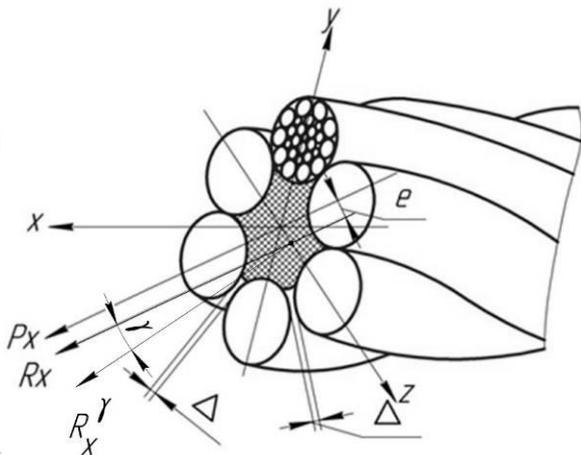


Рис. 1. Расчетная схема определения нагруженности каната с дефектом «волнистость» (P_x – внешняя нагрузка, действующая вдоль статической оси; R_x – фактическая осевая нагрузка, приложенная в центре тяжести сечения; R_x^y – нагрузка, действующая перпендикулярно фактическому сечению по касательной к динамической оси; e – эксцентриситет смещения центральной оси каната; Δ – расчетный межпрядевый зазор)

Значение максимальных напряжений σ_{max} элементов каната с «волнистостью» можно определить выражением:

$$\sigma_{max} = \sigma_p + \sigma_{доп} + \sigma_s \leq \frac{\sigma_B}{K_3}, \quad (1)$$

где σ_p – расчетные растягивающие напряжения в проволоках слоев прядей; $\sigma_{доп}$ – дополнительные напряжения, обусловленные влиянием изгиба и кручения каната; σ_s – напряжение, вызванное дефектом «волни-

стость»; σ_B – временное сопротивление материала проволок; K_3 – минимальный запас прочности каната [2].

Для круглопрядного каната двойной свивки значение σ_s определится выражением [6]:
$$\sigma_s = \frac{E}{\Delta} \cdot P_x \cdot r_B \left[\Delta_1 \cdot \cos^2 \alpha \cdot \cos^2 \beta + \Delta_2 \cdot r_k \left(\sin \beta \cdot \cos \beta + \frac{r}{r_k} \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos^4 \beta \right) + \Delta_3 \cdot r_k \cdot \cos^2 \beta \right], \quad (2)$$
 где E – модуль упругости; P_x – растягивающая осевая нагрузка; r_B – радиус волнистости дефектного участка; $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ – определители агрегатных коэффициентов жесткости каната; r, r_k – радиусы пряди и каната; α, β – углы свивки проволок в пряди и прядей в канате; φ – полярный угол.

Для определения основного параметра дефекта «волнистость» - d_b , который сигнализирует о степени риска при эксплуатации каната, решаем (1) с учетом (2), получив выражение:

$$d_b \leq d_k + \frac{\frac{\sigma_B - \sigma_0 - \sigma_{доп}}{K_3}}{K_u \cdot P_x \cdot r_k}, \quad (3)$$

где d_b – диаметр волнистости, d_k – номинальный размер каната, K_u – обобщенный коэффициент жесткости.

Согласно [3] основными параметрами волнистости канатов пассажирских канатных дорог являются: шаг H_b , направление и диаметр волнистости d_b (рис. 2). В случае совпадения направления свивки каната с направлением волнистости и равенства $H_b = H_k$ браковочным показателем является выражение $d_b \geq 1,08 d_k$, в случае несовпадения указанных условий канат подлежит браковке при $d_b > 1,33 d_k$.

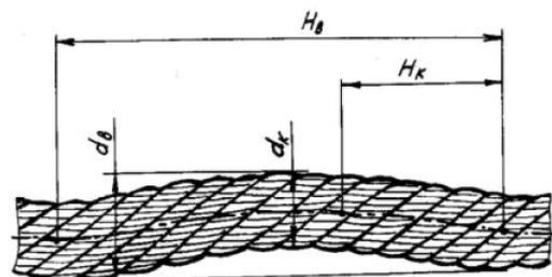


Рис. 2. Параметры волнистости несущего (тягового) каната: H_b и H_k – шаг волнистости и шаг свивки; d_b и d_k – диаметр волнистости и диаметр каната

Необходимо отметить, что в разделе «Нормы браковки стальных канатов» ФНП по пассажирским канатным дорогам [2] отсутствуют нормы браковки как круглопрядных канатов двойной свивки, так и несущих канатов закрытой конструкции по критерию «волнистость».

3. Разработанные модели и методы

Анализ геометрических параметров и структуры каната с имеющимся дефектом «волнистость», проведенный с использованием видеоаналитики и компьютерного 3D-моделирования подтвердил факт постоянного одностороннего смещения динамической оси относительно геометрического центра сечения, через который проходит статическая ось, сигнализируя о наличии дефекта «волнистость». Под статической осью понимается усредненная прямая, проходящая через рассматриваемые поперечные сечения по длине каната, а за динамическую ось принята линия, соединяющая центры тяжести этих сечений, хаотически смещающихся под действием неравномерности нагружения элементов каната. При имеющихся дефектах «местное увеличение (уменьшение) диаметра» динамическая ось смещается по обе стороны вблизи от статической.

На рис. 3 представлена компьютерная модель круглопрядного каната, которая демонстрирует процесс формирования волнистости за счет смещения динамической оси каната относительно статической на шести дискретных сечениях каната. Для классификации типа деформационного дефекта «волнистость» была разработана нейронная сеть, показанная на рис. 4.

С помощью средств видеоаналитики и компьютерного 3D-моделирования разработана 3D-модель каната, имеющего дефект «волнистость», которая представляет собой непрерывную, хаотично (дискретно) меняющую свое положение и наклон в вертикальной и горизонтальной плоскостях, цепь поперечных сечений (рис. 5), определены векторы действующих в процессе эксплуатации усилий. Установлено, что растягивающее усилие при осевом нагружении каната с де-

фектом «волнистость» приложено с эксцентриситетом, под углом к статической оси (по касательной к динамической). Полученная модель дает возможность использовать ее при исследовании напряженно-деформированного состояния канатов, имеющих дефект «волнистость».

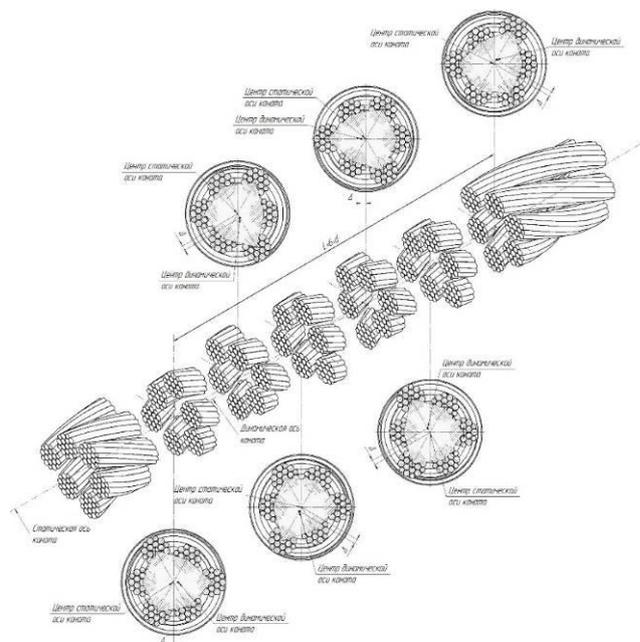


Рис. 3. Компьютерная модель шестипрядного каната с дефектом «волнистость»

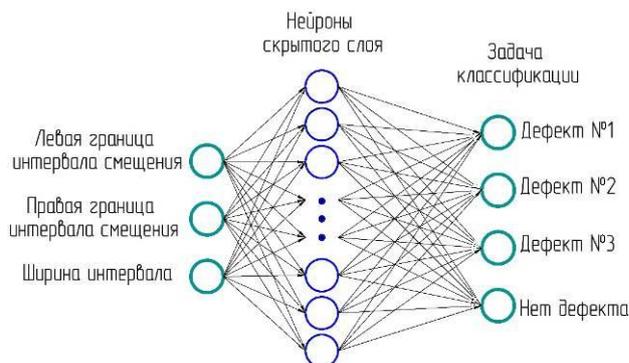


Рис. 4. Модель нейронной сети для определения типа дефекта «волнистость»

4. Результаты и их анализ

Анализ характеристик компьютерной и физической моделей позволяют повысить эффективность и качество контроля технического состояния канатов в процессе эксплуатации пассажирских канатных дорог [7-9].

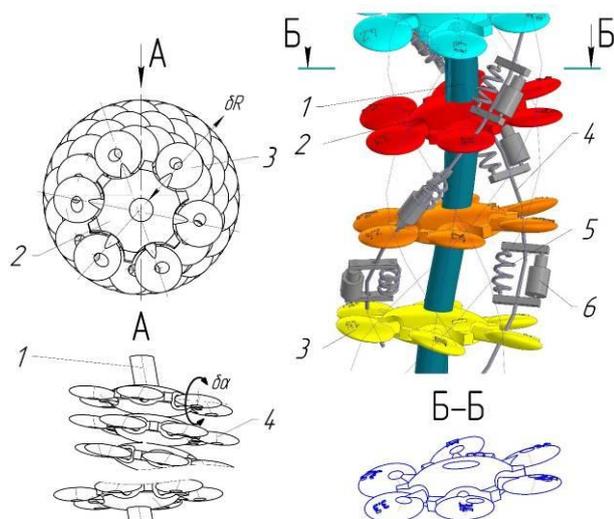


Рис. 5. 3D-модель стального каната, учитывающая дефект «волнистость» (1 – динамическая ось каната; 2 – сечение сердечника; 3 – сечение пряди; 4 – ось двойной винтовой спирали пряди; 5 – интегральная жесткость пряди (растяжения, изгиба, кручения); 6 – межпрядевое (межпроволочное) трение; δa – угол поворота сечения пряди; δR – смещение сечения пряди)

В связи с тем, что перечисленные дефекты, безусловно, влияют на обеспечение безопасности пассажиров при эксплуатации пассажирских канатных дорог, возрастает роль организации и проведения обслуживания и объективного контроля технического состояния стальных канатов, методов приборного обеспечения. В настоящее время нормативной документацией [1-3], а также руководствами по эксплуатации пассажирских канатных дорог предусматривается проведение ежедневных проверок, ежемесячных и ежегодных ревизий, обеспечивающих тщательный контроль стальных канатов, а также дефектоскопия (после монтажа, в последующем каждые три года в первые 15 лет работы пассажирских канатных дорог, затем ежегодно).

При выполнении проверок обслуживающий персонал (слесарь-обходчик), использует визуальный и измерительный виды контроля, выполняются замеры диаметра и шага свивки, контролируется наличие дефектов, их количество по всей длине канатов согласно браковочным показателям, используя при

этом зеркала для объемного контроля, мерительный инструмент, при необходимости – измерительные приборы.

Необходимо отметить, что мероприятия по контролю состояния канатов проводятся в стесненных условиях, на значительной высоте и при недостаточной освещенности. При этом через 15...20 минут непрерывной работы человеческий глаз теряет способность объективно контролировать соответствие обнаруженных дефектов критериям браковки, т.е. реальна возможность пропустить серьезный дефект с риском создания аварийной ситуации на дороге.

Кроме визуального и измерительного контроля известны такие способы контроля, как электромагнитная дефектоскопия, нашедшая широкое применение для оценки состояния внутренних проволок канатов, ультразвуковая дефектоскопия, способ акустической эмиссии с использованием переходных волновых процессов, когда с помощью датчиков эмиссии упругие волны преобразуются в электрические сигналы, характеризуя вид дефекта. Известны такие способы диагностирования, как деформационный и информационный [10], которые сегодня не нашли применения на канатных дорогах, как и такие известные способы, как ультразвуковой, вихревых токов, вибрационный, требующие дополнительных исследований.

Необходимо отметить, что для обнаружения дефектов возможно использование оптического метода, предназначенного для диагностирования наружной поверхности каната с наиболее часто встречающимися дефектами, описанными в начале статьи. Основой метода, предложенного в [1], является способ оптического дистанционного непрерывного мониторинга состояния каната на базе машинного зрения и искусственного интеллекта [11, 12] в виде программно-аппаратного комплекса контроля канатов, позволяющего с использованием средств видеофиксации полученных изображений достоверно оценивать полученные изображения несоответствий и повреждений методами машинного зрения с визуализацией результатов на мобильные приложения ответственных лиц.

Комплекс оптического мониторинга состоит из аппаратного корпуса с камерами, обеспечивающими полный обзор наружной поверхности несуще-тягового каната, модуль для сбора и обработки видеопотока и средства связи с сервером. На рис. 6 представлена компьютерная модель аппаратной части программно-аппаратного комплекса контроля канатов пассажирских канатных дорог. В состав комплекса входят: аппаратная часть, представляющая собой корпус с вмонтированным в него массивом оптических камер для обзора на 360 градусов, модуль обработки видеопотока и средства коммуникации для связи с сервером, программное обеспечение для поиска и классификации дефектов стальных канатов на основе глубокой сверточной искусственной нейронной сети, клиентское мобильное приложение. Для интегральной оценки технического состояния стального каната применена интеллектуальная система поддержки принятия решений, использующая методы искусственного интеллекта. В устройстве программно-аппаратного комплекса контроля канатов осуществлен способ обнаружения дефектов и повреждений канатов, созданный на основе алгоритмов быстрой детекции, имеющий высокую скорость и точность обнаружения несоответствий. Для распознавания дефектов применяется детектор YOLO на основе сверточной нейронной сети [13,14]. В процессе обучения датасет подразделяется на обучающую, тестовую и валидационную выборку.

При разработке программно-аппаратного комплекса контроля канатов для задач обнаружения дефектов геометрии каната был использован алгоритм математического обеспечения, состоящий из блока обнаружения волнистости и блока местного увеличения (уменьшения) диаметра каната, а также алгоритмы обнаружения других дефектов, вспомогательные алгоритмы настройки и алгоритмы обучения нейронной сети.

Алгоритмом обнаружения дефектов геометрии используется соотношение понятий статическая и динамическая ось. Обнаружение дефекта «волнистость» связано с односторонним смещением динамической оси каната по отношению к статической. С по-

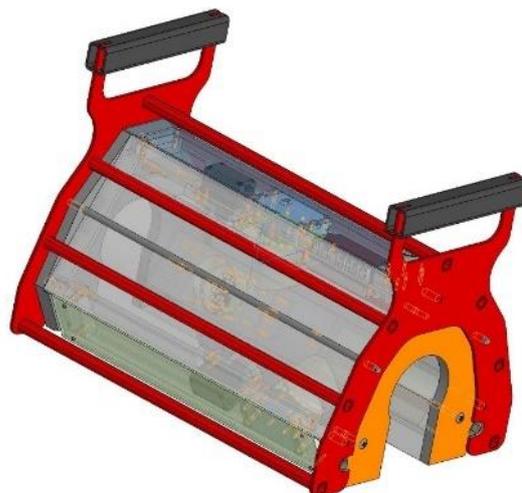


Рис. 6. Компьютерная модель аппаратной части программно-аппаратного комплекса контроля канатов

мощью этого алгоритма определяются границы интервалов смещения осей, анализируется ширина интервалов и величина смещений, определяется вид дефекта.

Информация, полученная при диагностировании канатов, обрабатывается, при этом результаты уровня опасности отображаются в цветовой гамме в мобильном приложении персонала (или других лиц), а пользователь, при необходимости, может определить вид и изображение дефектов, места их возникновения на длине каната. Обучение нейронной сети должно проводиться на основе базы данных о видеопотоках типовых дефектов канатов, позволяющих определять несоответствия при небольшой обучающей выборке.

5. Заключение

1. Производственные испытания программно-аппаратного комплекса контроля канатов (рис. 7), проведенные при эксплуатации пассажирских канатных дорог горнолыжного курорта «Роза Хутор» (Красная Поляна), подтвердили эффективность использования программно-аппаратного комплекса при контроле технического состояния стальных канатов, что предполагает возможность использования программно-аппаратного комплекса контроля канатов в процессе эксплуатации при осмотре, диагностировании и экспертизе стальных канатов пассажирских канатных дорог.

2. Рекомендовать дополнить раздел «Нормы браковки стальных канатов» ФНП по пассажирским канатным дорогам норма-

ми браковки «волнистость» для круглопрядных канатов двойной свивки, так и для несущих канатов закрытой конструкции.



Рис. 7. Опытный образец программно-аппаратного комплекса

Список литературы

1. Панфилов А.В. Методология обеспечения безопасности труда персонала при перевозке пассажиров машинами на канатной тяге: автореферат дисс. ... докт. техн. наук. Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2024. 40 с.

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

3. Межгосударственный стандарт ГОСТ 34952-2023 Подвесные канатные дороги для транспортирования людей. Канаты. Требования безопасности. М.: Российский институт стандартизации, 2023.

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

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. Короткий А.А. Методологические основы оценки, прогнозирования и управления промышленной безопасностью подъемных сооружений: Автореферат дисс.

References

1. Panfilov A.V. Methodology of ensuring the safety of personnel during the transportation of passengers by cable cars: abstract of the Diss. Doct. Sci. (Engineering). Rostov-on-Don. 2024. 40 p. (In Russian).

2. Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoj bezopasnosti «Pravila bezopasnosti passazhirskih kanatnyh dorog i funikulerov». Utv. prikazom Federalnoj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 13.11.2020 g. №441. (In Russian).

3. GOST 34952-2023 *Suspended cable cars for transporting people. Ropes. Safety requirements*. Moscow, Rossiyskiy institut standartizatsii, 2023 (In Russian)

4. RD ROSEK 012-97. *Kanaty stalnye. Kontrol i normy brakovki*. 52 p (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-tekhnicheskij vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, No. 1, pp. 53-65. (In Russian).

6. Korotkiy A.A. Methodological foundations of assessment, forecasting and management of industrial safety of lifting structures: abstract of the Diss. Doct. Sci. (Engineering). Novocheerkassk, 1997. 37 p. (In Russian).

7. Olszyna G., Sioma A., Tytko A. As-

... доктора техн. наук. Новочеркасск, 1997. 37 с.

7. Olszyna G., Sioma A., Tytko A. Assessment of the condition of hoisting ropes by measuring their geometric parameters in a three-dimensional image of their surface // *Archives of Mining Sciences*, 2013. Vol. 58, No. 3. Pp. 643-654.

8. Huang X., Liu Z., Zhang X., Kang J., Zhang M., Guo Y. Surface Damage Detection for Steel Wire Ropes Using Deep Learning and Computer Vision Techniques // *Measurement*. 2020. Vol. 161.

DOI:10.1016/j.measurement.2020.107843.

9. Zhang G., Tang Z., Fan Y., Liu J., Jahanshahi H., Aly A.A. Steel Wire Rope Surface Defect Detection Based on Segmentation Template and Spatiotemporal Gray Sample Set // *Sensors*. 2021. Vol. 21. Pp. 5401. DOI: 10.3390/s21165401.

10. 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.

11. Панфилов А.В., Николаев Н.Н., Юсупов А.Р., Короткий А.А. Интегральная оценка риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения // *Безопасность техногенных и природных систем*, 2023. № 1.

12. 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.

13. Dlamini S., Chih Y.K., Shun L.S., Chung-Feng J.K. Development of a real-time machine vision system for functional textile fabric defect detection using a deep YOLOv4 model // *Textile Reseach Journal*. 2021. №. 92. Pp. 675-690.

14. Hussain M. YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection // *Machines*. 2023. Vol. 11. P. 25.

assessment of the condition of hoisting ropes by measuring their geometric parameters in a three-dimensional image of their surface. *Archives of Mining Sciences*, 2013. Vol. 58, No. 3, pp. 643-654.

8. Huang X., Liu Z., Zhang X., Kang J., Zhang M., Guo Y. Surface Damage Detection for Steel Wire Ropes Using Deep Learning and Computer Vision Techniques. *Measurement*, 2020. Vol. 161.

DOI:10.1016/j.measurement.2020.107843.

9. Zhang G., Tang Z., Fan Y., Liu J., Jahanshahi H., Aly A.A. Steel Wire Rope Surface Defect Detection Based on Segmentation Template and Spatiotemporal Gray Sample Set. *Sensors*, 2021, Vol. 21, pp. 5401. DOI: 10.3390/s21165401.

10. Panfilov A.V., Korotkiy A.A., Ivanov B.F., Yusupov A.R. Control of ropes during operation of machines with rope traction. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2022. No. 4. (In Russian).

11. Panfilov A.V., Nikolaev N. N., Yusupov A. R., Korotkiy A. A. Integral risk assessment in the diagnosis of steel ropes using computer vision. *Bezopasnost tekhnogennyh i prirodnih system*. 2023. No. 1. (In Russian).

12. Patent RU 2775348. *Sposob vizualno-izmeritelnogo 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).

13. Dlamini S., Chih Yuan Kao, Shun Lian Su, Chung-Feng Jeffrey Kuo. Development of a real-time machine vision system for functional textile fabric defect detection using a deep YOLOv4 model. *Textile Reseach Journal*, 2021, No. 92, pp. 675-690.

14. Hussain M. YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection. *Machines*, 2023, Vol. 11, pp. 25.