

# МАШИНОСТРОЕНИЕ

## MACHINE BUILDING



УДК 629

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-32-46>

### Прогнозирование надежности стальных канатов на этапе проектирования

А.А. Котесов

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

✉ [a.kotesov@yandex.ru](mailto:a.kotesov@yandex.ru)

EDN: CEJWGJ

#### Аннотация

**Введение.** Обеспечение безопасности грузоподъемных машин тесно связано с надежностью стальных канатов, работающих под переменными нагрузками и в агрессивных средах. Рост сложности конструкций, высокая интенсивность эксплуатации и увеличение грузоподъемности машин приводят к росту техногенных рисков и экономическим потерям. Традиционные методы — статические коэффициенты запаса и визуальный контроль — неэффективны при цифровизации и росте интенсивности эксплуатации. По данным надзорных органов, 20 % аварий на подъемных сооружениях вызваны дефектами канатов, а ежегодно фиксируется свыше 5000 инцидентов с травматизмом. В литературе описаны статистический анализ дефектов, трибологические модели износа проволок с учетом трения и деградации смазки, иерархическое моделирование каната как системы. Однако сохраняются серьезные системные проблемы: модели слабо интегрированы в практику, теория отделена от инженерных методов и предиктивные модели не предусматривают комплексного анализа динамики эксплуатационных факторов. Поэтому целью данной работы явилась разработка предиктивной модели оценки надежности стального каната на этапе проектирования с учетом нормативных требований для исключения внезапных отказов и оптимизации эксплуатации.

**Материалы и методы.** В основе исследования — предложенная иерархическая декомпозиция надежности каната по уровням деградации, позволившая алгоритмизировать принцип «слабого звена» для последовательных систем. Объект моделирования — стальной канат 6×36 ЛК-РО по ГОСТ 7668-80 в составе механизмов портального крана. Адаптация норм РД РОСЭК 012-97 к задачам проектирования выполнена методом полиномиальной аппроксимации дискретных критериев в непрерывные функции предельных состояний. Для оценки безотказности на различных уровнях иерархии использован комплекс моделей Кельвина–Фойгта, Арчарда, Веллера, а также распределения Вейбулла, Пуассона и нормальный закон. Математическая обработка данных и расчеты вероятностных показателей реализованы в средах MS Excel и Mathcad. Верификация модели проведена сопоставлением прогнозных кривых с расчетным ресурсом по методике ISO 16625 для режимов М5 и М6.

**Результаты исследования.** На основе норм браковки РД РОСЭК 012–97 определены обобщенные предельные состояния каната 6×36 ЛК-РО (ГОСТ 7668). Получены аналитические зависимости допустимого числа обрывов от износа и коррозии, а также функции связи потери площади сечения с накопленными дефектами для режимов М1–М8. Разработана комплексная предиктивная модель надежности, объединяющая вероятностные процессы накопления обрывов проволок, кинетику износа и реологическую деградацию сердечника в единую вычислительную схему.

**Обсуждение.** Предложенный подход сокращает разрыв между теорией и практикой эксплуатации за счёт учета синергии механизмов деградации. Противоречие между параллельным развитием дефектов и последовательной «моделью слабого звена» разрешено через принцип критичности каждого предельного состояния. В отличие от аддитивных методов реализована концепция динамически зависимых параметров — реологические изменения сердечника трансформируют условия контакта проволок и тем самым ускоряют накопление усталостных повреждений. Применение разработанного аппарата в проектировании повышает точность прогноза. В то же время гетерогенность используемых моделей диктует необходимость создания специфического критерия достоверности для оценки суммарной погрешности.

**Заключение.** Модель предназначена для применения на этапе проектирования грузоподъемных машин с целью предиктивной оценки безотказности и минимизации рисков внезапных отказов канатов по ГОСТ 7668–80. Модель позволяет учесть нормативные требования и обеспечивает на 37 % более консервативный прогноз по сравнению с ISO 16625. Дальнейшее развитие предполагает распространение модели на другие конструктивные группы канатов и внедрение в инженерную практику.

**Ключевые слова:** стальной канат, надежность, безотказность, предиктивная модель, иерархическая декомпозиция, износ и коррозия, реологическая деградация сердечника

**Благодарности.** Автор выражает благодарность рецензентам, чья критическая оценка представленных материалов и конструктивные предложения по их совершенствованию способствовали существенному повышению качества изложения результатов исследования.

**Для цитирования.** Котесов А.А. Прогнозирование надежности стальных канатов на этапе проектирования. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2026;10(1):32–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-32-46>

*Original Theoretical Research*

## Predicting the Reliability of Steel Ropes at the Design Stage

Anatoly A. Kotesov 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ [a.kotesov@yandex.ru](mailto:a.kotesov@yandex.ru)

### Abstract

**Introduction.** Ensuring the safety of lifting equipment is closely linked to the reliability of steel ropes operating under variable loads and in aggressive environments. Increased design complexity, higher operational intensity, and larger machine lifting capacities lead to increased human-made risks and economic losses. Traditional methods, such as static safety factors and visual inspections, are ineffective in the face of digitalization and increased operational intensity. According to regulatory authorities, 20% of accidents involving lifting equipment are caused by rope defects, with more than 5,000 injury incidents recorded annually. The literature describes statistical defect analysis, tribological models of wire wear that take into account friction and lubricant degradation, and hierarchical modeling of rope as a system. However, there are still some serious systemic problems: models are not fully integrated into practice, theoretical knowledge is not always applied in engineering methods, and predictive models do not allow for a comprehensive analysis of operational factors. To address these issues, the aim of this work is to develop a predictive model for assessing the reliability of steel ropes at the design stage. This model takes into account regulatory requirements in order to prevent sudden failures and optimize operations.

**Materials and Methods.** The study was based on the proposed hierarchical decomposition of rope reliability by degradation levels, which allowed for the algorithmic implementation of the “weakest link” principle for sequential systems. The modeling object was a 6×36 WS FC (two lay rope type) steel rope according to GOST 7668–80 used in gantry crane mechanisms. RD ROSEK 012–97 standards were adapted to the design tasks using a polynomial approximation method of discrete criteria into continuous limit state functions. To assess reliability at various hierarchical levels, a combination of Kelvin-Voigt, Archard, and Weller models, as well as the Weibull, Poisson, and normal distributions, was applied. Mathematical data processing and probability calculations were implemented in MS Excel and Mathcad. The model was verified by comparing predicted curves with the estimated service life according to the ISO 16625 methodology for M5 and M6 modes.

**Results.** Based on the RD ROSEK 012–97 rejection standards, generalized limit states for 6×36 WS FC rope (GOST 7668) were determined. Analytical functions were derived for the relationship between the permissible number of breaks, wear, and corrosion, as well as the dependence of cross-sectional area loss on accumulated defects for M1–M8 modes. A comprehensive predictive reliability model was developed that integrates probabilistic processes of wire breakage accumulation, wear kinetics, and rheological degradation of the core into a single calculation model.

**Discussion.** The proposed approach aims to bridge the gap between theoretical knowledge and operational practice, by considering the synergy of degradation mechanisms. It resolves the contradiction between the parallel development of defects and the sequential approach (“weakest link model”), using the principle of criticality in any limit state. Unlike additive methods, this approach incorporates the concept of dynamically dependent parameters. The rheology of the material alters the contact conditions between wires, accelerating fatigue damage accumulation. Using this approach as an analytical tool during design ensures high accuracy in predictions. However, due to the heterogeneity of models, it is necessary to develop a specific criterion for assessing overall error.

**Conclusion.** The model is designed to be used during the design phase of lifting equipment to predictively assess reliability and minimize the risk of sudden rope failure in accordance with GOST 7668–80. It takes into account regulatory requirements and provides a 37% more conservative forecast compared to ISO 16625. Future development plans include extending the model to other rope design groups and integrating it into engineering practice.

**Keywords:** steel rope, reliability, failure-free operation, predictive model, hierarchical decomposition, wear and corrosion, rheological degradation of the core

**Acknowledgements.** The author would like to express their gratitude to the reviewers for their critical assessment of the submitted materials and their constructive suggestions for improvement. These comments have significantly contributed to the enhancement of the quality of the research presentation.

**For Citation.** Kotesov AA. Predicting the Reliability of Steel Ropes at the Design Stage. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(1):32–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-32-46>

**Введение.** Стальные канаты являются критически важными несущими элементами грузоподъёмных машин, определяющими их безопасность и эксплуатационную эффективность. По данным Ростехнадзора и мировых отраслевых исследований, до 20 % аварий с подъёмными сооружениями связаны с критическими дефектами канатов. Выход каната из строя влечёт экономические потери вследствие простоев и нарушений логистических циклов, а также техногенные последствия. Статистика показывает, что ежегодно регистрируется более 5 000 инцидентов, вызванных обрывом тяговых и несущих элементов, причём около 30 % происшествий имеют последствия для жизни и здоровья людей [1].

Стальной канат представляет собой сложную механико-техническую систему, в которой нагрузка распределяется между взаимосвязанными группами элементов, работающими в разнородных условиях и подверженными старению, коррозии, износу и усталостным повреждениям, — что существенно затрудняет оценку надёжности объекта в целом. Существующие методы проектирования компенсируют неопределённость через значительные коэффициенты запаса прочности. Однако практика показывает, что такой подход не обеспечивает требуемой надёжности для современных мощных грузоподъёмных машин с высокой интенсивностью работы — он не исключает внезапных отказов и является экономически неоптимальным. В этих условиях для снижения техногенных рисков и повышения эффективности эксплуатации необходим переход от применения коэффициентов запаса и визуального контроля к предиктивному проектированию и аналитике, обеспечивающим расчётный уровень надёжности на основе прогнозных моделей отказа.

Исследования надёжности стальных канатов ведутся десятилетиями и охватывают стадии проектирования, производства и эксплуатации. В 1963 году при поддержке организаций OITAF и RILEM была учреждена международная организация по изучению усталости канатов — OIPEEC.

Современное развитие искусственного интеллекта и цифрового зрения существенно продвинуло вопросы предиктивной аналитики стальных канатов. Разработанные методы и автоматизированные цифровые системы контроля, описанные в работах Хальфина М.Н. [2, 3], Короткого А.А. [4, 5], Панфилова А.В. [6, 7] и Кульчицкого А.А. [8], активно внедряются в эксплуатационную практику.

Важным этапом для развития предиктивного проектирования является актуализация стандарта ISO 16625, который предполагает определять коэффициент запаса и осуществлять оценку усталостной долговечности с учётом множества факторов, что знаменует собой переход от упрощённых расчетов к глубокому моделированию реальных условий эксплуатации.

Сложность распределения механических свойств и нагрузок между элементами — определяющий фактор надёжности стального каната. Многослойная структура каната носит иерархический характер: внутренние элементы служат опорой для наружных, и нарушение этих опорных связей приводит к деградации структуры каната и изменению условий работы его элементов. Wahid A. [9, 10] обозначает это явление как эффект «системного износа», возникающий при потере стабильности сердечника.

Основой для внедрения предиктивного проектирования является рассмотрение каната как системы. Mouradi H. [11] предложил метод прогнозирования долговечности с применением мажоритарной логики, где ключевой аспект — математическая связь между вероятностью безотказной работы и степенью накопленного повреждения. Bassir Y. [12] отмечает, что анализ иерархической структуры позволяет преобразовать статистику отказов базовых элементов в точный прогноз надёжности всего каната. Xia Y. [13] предлагает проводить анализ методом конечных элементов на трёх иерархических уровнях: микроуровне — контакт проволок, мезоуровне — взаимодействие прядей и макроуровне — поведение всего каната. Такой подход учитывает локальное трение и прерывистое скольжение при изгибе, описанные в модели Han Y. [14], а также потерю площади сечения от износа во времени, рассмотренную Salleh S. [15]. Исследования Peng Y. [16] и Xu C. [17] фокусируются на процессах внутреннего трения и межпроволочного износа, подтверждая, что интенсивность деградации напрямую зависит от параметров свивки и режима смазки. Головин В.П. [18] демонстрирует эффективность синтетических загустителей канатных смазок, а Peng H. [19] подчёркивает необходимость учёта деградации

свойств смазки как ключевого фактора долговечности каната. Волоховский В.Ю. [20] исследует влияние термодвижений на канаты металлургических кранов и предлагает переход от детерминированных расчётов к оценке риска как вероятности случайного события — при котором диагностический показатель каната выходит за установленный браковочный уровень.

Анализ современных работ показывает, что, несмотря на глубокую проработку отдельных аспектов эксплуатации канатов, остаётся недостаточно изученным вопрос оценки их надёжности как элементов машин. Разрыв между теоретическими моделями деградации и практическими методами проектирования препятствует полной реализации потенциала предиктивного подхода. Вследствие этого актуальной задачей становится нормирование надёжности, требующее установления количественных нормативных значений и выбора адекватных критериев оценки. Возникает объективная потребность в создании комплексных моделей прогнозирования надёжности, учитывающих конструктивные особенности каната, предполагаемые условия эксплуатации и требования нормативно-технической документации.

Цель данного исследования — разработать модель прогнозирования надёжности стального каната, учитывающую многокомпонентную структуру, эксплуатационные условия и требования нормативно-технической документации (на примере каната двойной свивки ГОСТ 7668 в составе механизмов портального крана).

Задачи исследования:

- выполнить анализ требований нормативно-технической документации и определить границы работоспособности стального каната;
- определить граничные значения показателей, соответствующих переходу системы в предельное состояние с учётом доминирующих механизмов разрушения;
- выполнить интеграцию нормативных критериев в модель прогнозирования надёжности;
- разработать комплексную математическую модель оценки надёжности.

**Материалы и методы.** Исследование базируется на предложенной иерархической декомпозиции надёжности стального каната по уровням деградации и алгоритмизации принципа «слабого звена» для последовательных систем согласно принципам расчёта вероятности безотказной работы элементов грузоподъёмных кранов РТМ 24.090.25–76. Объектом моделирования выбран стальной канат двойной свивки диаметром 27 мм конструкции  $6 \times 36(1+7+7/7+14)+1$  о.с. ЛК-РО по ГОСТ 7668–80 в составе механизма подъёма портального крана «Кировец» КПП 16/20 (рис. 1, таблица 1).

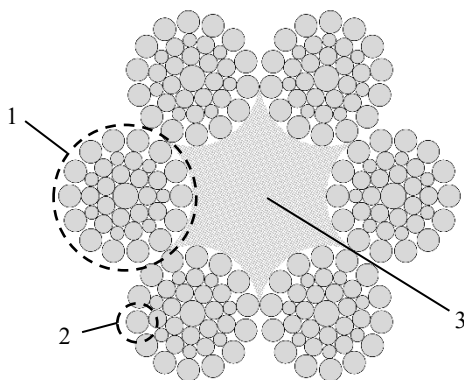


Рис. 1. Поперечное сечение стального каната  $6 \times 36(1+7+7/7+14)+1$  о.с. ЛК-РО по ГОСТ 7668–80:  
1 — прядь; 2 — проволока; 3 — органический сердечник

Таблица 1

Конструкция пряди стального каната 27 мм  $6 \times 36$  ЛК-РО по ГОСТ 7668–80

	Центральная	1-й слой	2-й слой А	2-й слой Б	3-слой (внешний)
Группа проволок пряди					
Количество, шт.	1	7	7	7	14
Диаметр проволоки, мм	1,70	1,20	1,20	0,90	1,50

В качестве показателя надежности стального каната согласно ГОСТ Р 27.102–2021<sup>1</sup> принята безотказность. Выбор показателя обусловлен неремонтопригодностью каната как отдельного элемента грузоподъемной машины и непрерывным характером процессов коррозии проволок и старения (разложения) сердечника, которые могут протекать независимо от интенсивности эксплуатации.

Для установления границ работоспособности стального каната выполнен анализ норм браковки РД РОСЭК 012–97<sup>2</sup>, которые учитывают дефекты, вызванные естественным износом и старением материала каната (таблица 2) и допустимое число обрывов проволок с учетом интенсивности износа и группы классификации (режима работы) механизма (таблица 3). Анализируемые дефекты систематизированы по характеру деградации: А — обрывы проволок; Б — износ проволок; В — деградация органического сердечника. Учитывая дискретный характер процесса накопления повреждений, расчетные значения количества обрывов округлялись до целых величин в большую сторону. Из рассмотрения исключены критические дефекты, возникающие мгновенно, такие как заломы, перегибы, повреждения электрической дугой, молнией, огнем и т.д.

Таблица 2

Нормы браковки стального каната 6×36(1+7+7/7+14) +1 о.с. ЛК-РО ГОСТ 7668 при эксплуатации на грузоподъемных кранах согласно РД РОСЭК 012–97

Обозначение дефекта	Описание дефекта	Нормы браковки	Механизм (причина) возникновения дефекта
A1	Обрывы наружных проволок на участке 6d	Допустимое количество обрывов указано в таблице 3	Усталостный износ, механический износ, коррозия (кислородная, электрохимическая, химическая)
A2	Обрывы наружных проволок на участке 30d	Допустимое количество обрывов указано в таблице 3	
A3	Местные обрывы проволок сосредоточенные на одной пряди каната	Три и более оборванные проволоки	
B1	Поверхностный износ каната	Уменьшение диаметра наружных проволок на 40 % и более	Механический износ и коррозия (кислородная, электрохимическая, химическая)
B2	Потеря металлической части поперечного сечения каната (потеря внутреннего сечения)	Потеря металлической части поперечного сечения каната на 17,5% и более	Обрывы, механический износ и коррозия (кислородная, электрохимическая, химическая) проволок внутренних слоев
B3	Поверхностный износ и коррозия	Уменьшение диаметра каната на 7 % и более	Механический износ, коррозия (кислородная, электрохимическая, химическая)
B1	Уменьшение диаметра каната в результате повреждения сердечника	Уменьшение диаметра каната на 10 %	Износ, смятие, разрывы, старение волокон или полное разрушение (обрыв) сердечника
B2	Местное увеличение диаметра каната	Увеличение диаметра каната на 7 %	Воздействие влаги и низких температур приводит к расширению (набуханию) сердечника. Неравномерное перераспределение волокон сердечника по длине (область наката)

<sup>1</sup> ГОСТ Р 27.102–2021 *Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения*. URL: [https://rosgos.ru/file/gost/21/020/gost\\_r\\_27.102-2021.pdf](https://rosgos.ru/file/gost/21/020/gost_r_27.102-2021.pdf) (дата обращения: 20.10.2025).

<sup>2</sup> РД РосЭК 012–97 *Руководящий документ. Канаты стальные. Контроль и нормы браковки*. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293850/4293850134.pdf> (дата обращения: 20.10.2025).

Таблица 3

Число обрывов проволок, при наличии которых бракуются стальные канаты грузоподъемных кранов, работающие со стальными и чугунными блоками, имеющие конструкцию  $6 \times 36(1+7+7/7+14) + 1$  о.с. ЛК-РО по ГОСТ 7668 согласно РД РОСЭК 012–97

Уменьшение диаметра проволок в результате поверхностного износа или коррозии, %	Процент допустимого количества обрывов проволок в зависимости от износа, %	Группа классификации (режима) механизма	Количество обрывов проволок $N^*$			
			Крестовая свивка		Односторонняя свивка	
			На участке длиной			
			6d	30d	6d	30d
0	100	M1 – M4	7	14	4	7
		M5 – M8	14	29	7	14
10	85	M1 – M4	5	11	3	5
		M5 – M8	11	24	5	11
15	75	M1 – M4	5	10	3	5
		M5 – M8	10	21	5	10
20	70	M1 – M4	4	9	2	4
		M5 – M8	9	20	4	9
25	60	M1 – M4	4	8	2	4
		M5 – M8	8	17	4	8
30 и более	50	M1 – M4	3	7	2	3
		M5 – M8	7	14	3	7

Примечание: \*  $N$  — число обрывов проволок 3-го (внешнего) слоя;  $d$  — диаметр каната, мм

Для синтеза модели прогнозирования выполнена декомпозиция надежности стального каната по уровням деградации и определены обобщенные предельные состояния по группам А, Б, В (таблица 4). Иерархическая связь между уровнями деградации реализована через систему динамически зависимых параметров, в которой прогнозные значения износа и деформации на текущем шаге времени выступают в роли переменных граничных условий для оценки последующих состояний системы. Методика расчёта потерь металлического сечения основана на совместном учёте механического износа проволок и атмосферной коррозии. Параметры агрессивности среды введены в модель как аддитивный фактор деградации, определяющий скорость уменьшения диаметра проволок внешнего слоя каната.

Методика обоснования обобщенного предельного состояния по группе Б реализована через расчёт суммарной потери площади металлического сечения как функции поверхностного износа проволок с учётом динамического порога обрывов  $N_{lim}$ , определяющей точку совместного достижения предельного состояния по критериям Б1 (износ) и Б2 (потеря сечения) (рис. 2, 3).

Определение динамически изменяющегося порога допустимого количества обрывов  $N_{lim}$  выполнено на основе аппроксимации дискретных зависимостей, представленных в таблице 3 (рис. 4, 5).

Для верификации результатов применён сравнительный анализ прогнозных кривых безотказности с расчётным значением медианного ресурса для режима эксплуатации М6 по ISO 16625. Математическая обработка данных выполнена с использованием MS Excel 14.0.4760.1000 и Mathcad 14.0.0.163. Зависимости аппроксимированы полиномиальной функцией 3–4 порядка; коэффициент детерминации находился в интервале 0,9425–0,9998.

**Результаты исследования.** В ходе исследования получены зависимости суммарной потери площади сечения металлической части каната от величины поверхностного износа проволок внешнего слоя (рис. 2, 3). Согласно полученным кривым, установлено, что при учете вклада динамического количества обрывов проволок  $N_{lim}$  и формальном соблюдении нормативных требований по износу (таблица 2), критический порог в 17,5 % (дефект Б2) достигается при значениях поверхностного износа менее 40 % (дефект Б1).

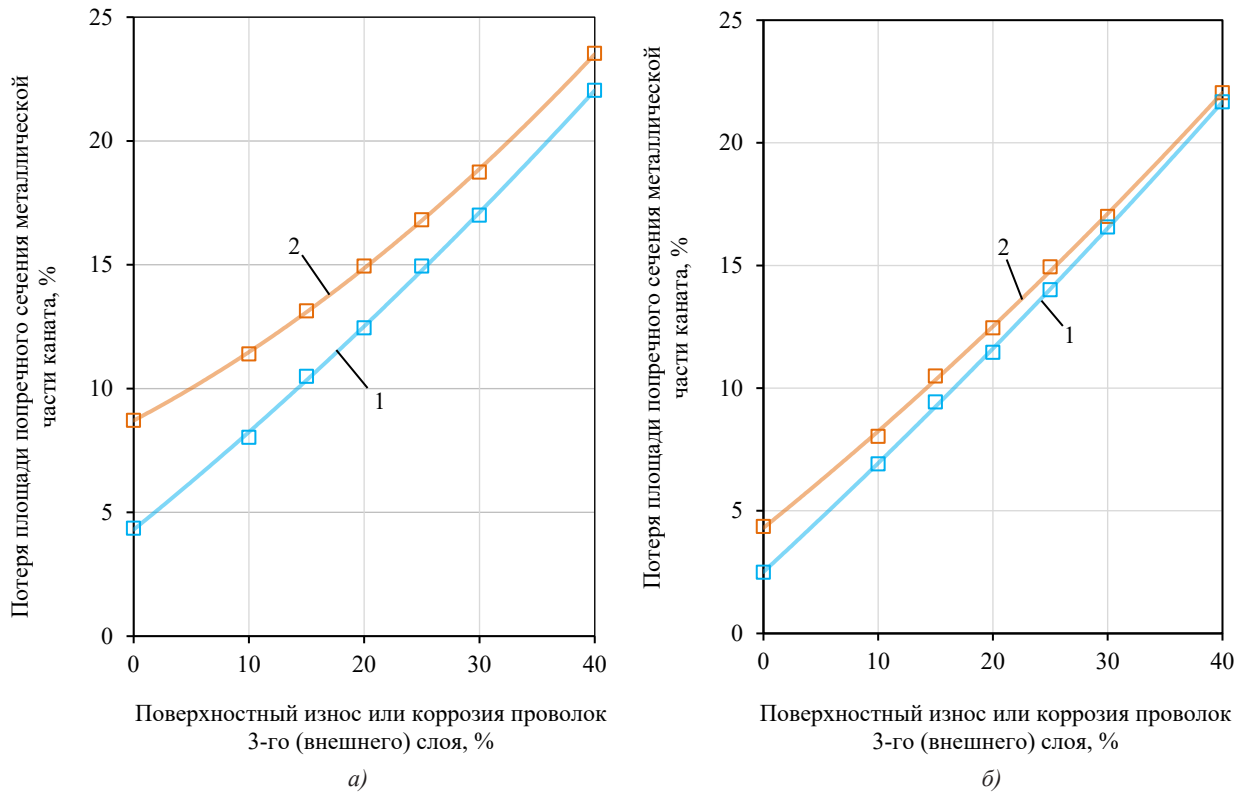


Рис. 2. Зависимость потерь площади поперечного сечения металлической части каната от числа обрывов, поверхностного износа или коррозии проволок 3-го (внешнего) слоя для группы классификации (режима) механизма М1–М4: а — крестовая свивка; б — односторонняя свивка; 1 — на участке длиной  $6d$ ; 2 — на участке длиной  $30d$ ;  $d$  — диаметр каната

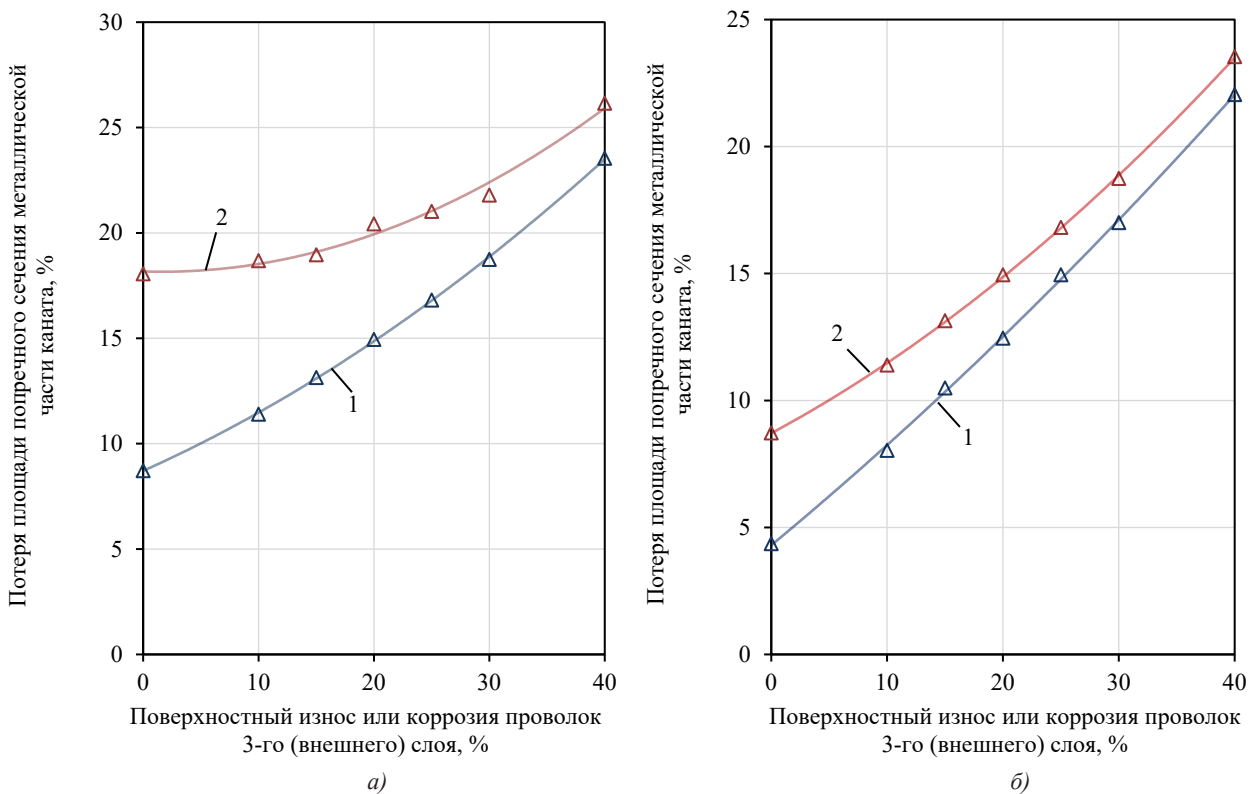


Рис. 3. Зависимость потерь площади поперечного сечения металлической части каната от числа обрывов, поверхностного износа или коррозии проволок 3-го (внешнего) слоя для группы классификации (режима) механизма М5–М8: а — крестовая свивка; б — односторонняя свивка; 1 — на участке длиной  $6d$ ; 2 — на участке длиной  $30d$ ;  $d$  — диаметр каната

В результате иерархической декомпозиции надежности каната по уровням деградации выполнено обобщение нормативных дефектов (таблицы 2, 3) и произведен подбор математических моделей прогнозирования безотказности. Сформулированные обобщенные критерии предельных состояний и соответствующий им расчетный аппарат систематизированы и описаны в таблице 4.

Обобщенные предельные состояния и модели прогнозирования надежности стального каната  $6 \times 36(1+7+7/7+14)+1$  о.с. ЛК-РО по ГОСТ 7668 по группам дефектов

Группа дефектов	Объединенные частные дефекты	Обобщенное предельное состояние группы	Модель оценки безотказности
А	А1, А2 (распределенные обрывы), А3 (локальные обрывы на пряди)	Достижение порогового количества обрывов $N_{lim}$ , динамически зависящего от текущего износа или наличие $\geq 3$ обрывов в одной пряди	Неоднородный пуассоновский процесс в сочетании с моделью «слабого звена» (оценивает вероятность того, что дискретное количество обрывов не превысит порог безопасности)
Б	Б1 (износ проволок), Б2 (внутреннее сечение), Б3 (номинальный диаметр)	Уменьшение площади металлического сечения ниже допустимого (17,5 %) в результате кумулятивного износа внешних и внутренних проволок	Кинетическая модель деградации Арчарда с коррозионным аддитивом (определяет вероятность сохранения несущей способности выше критического уровня)
В	В1 (усадка или разрушение сердечника), В2 (набухание сердечника)	Выход номинального диаметра каната за пределы интервала $[-10 \%; +7 \%]$ , ведущий к потере радиальной опоры прядей	Реологическая модель стабильности структуры Кельвина-Фойгта (оценивает вероятность неразрушения сердечника и сохранения геометрической формы каната)

На основании данных таблицы 3 получены аналитические зависимости допустимого количества обрывов проволок  $N_{lim}$  от степени (величины) поверхностного износа и коррозии внешнего слоя проволок —  $x$  (выраженной в процентах от номинального диаметра проволок), определяющие динамически изменяющиеся границы работоспособности каната в модели надежности (рис. 4, 5).

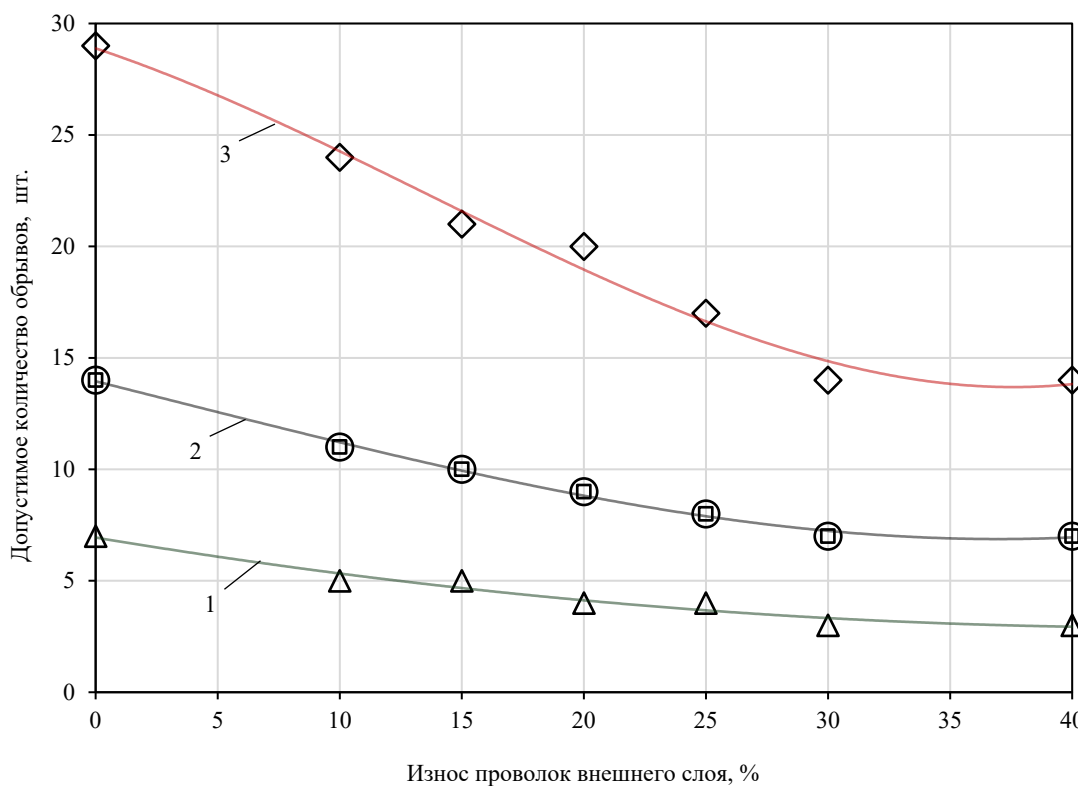


Рис. 4. Зависимость допустимого количества обрывов от износа и коррозии проволок внешнего слоя для группы классификации (режима) механизма М1-М4 для каната конструкции  $6 \times 36(1+7+7/7+14)+1$  о.с. ЛК-РО ГОСТ 7668: 1 — односторонней свивки на участке  $6d$  ( $R^2 = 0,9617$ ); 2 — крестовой свивки на участке  $6d$  и односторонней свивки на участке  $30d$  ( $R^2 = 0,9959$ ); 3 — крестовой свивки на участке  $30d$  ( $R^2 = 0,9866$ );  $d$  — диаметр каната

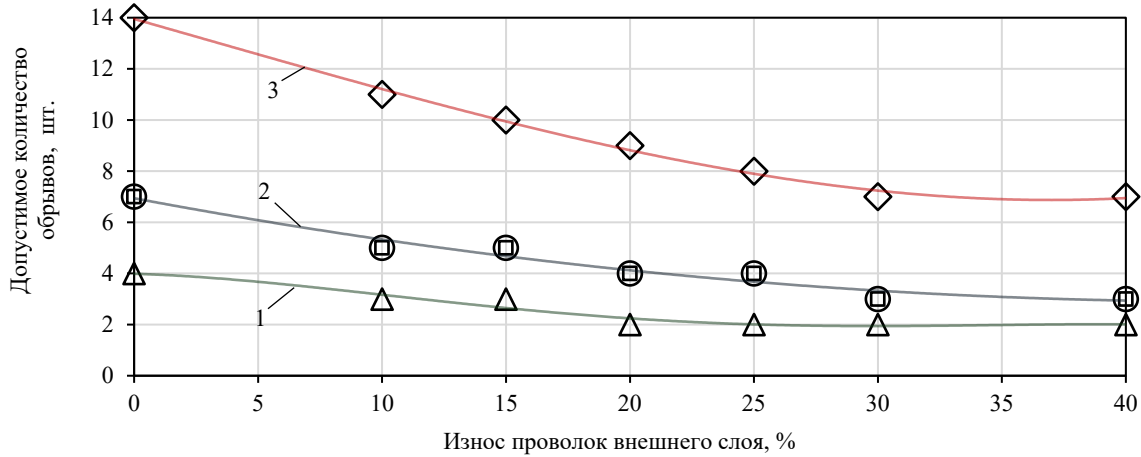


Рис. 5. Зависимость допустимого количества обрывов от износа и коррозии проволок внешнего слоя для группы классификации механизма М5-М8 для каната конструкции  $6 \times 36(1+7+7/7+14) + 1$  о.с. ЛК-РО ГОСТ 7668: 1 — односторонней свивки на участке  $6d$  ( $R^2 = 0,9959$ ); 2 — крестовой свивки на участке  $6d$  и односторонней свивки на участке  $30d$  ( $R^2 = 0,9617$ ); 3 — крестовой свивки на участке  $30d$  ( $R^2 = 0,9425$ );  $d$  — диаметр каната

Для определения допустимого количества обрывов проволок  $N_{lim}(x)$  получены следующие выражения для канатов:

– односторонней свивки на участках  $6d$  в режиме М1-М4 и  $30d$  в режиме М5-М8, а также крестовой свивки на участке  $6d$  в режиме М5-М8:

$$N_{lim}(x) = (-3,0 \cdot 10^{-18})x^3 + (2,0 \cdot 10^{-3})x^2 - 0,18x + 6,94; \quad (1)$$

– крестовой свивки на участках  $6d$  в режиме М1-М4 и  $30d$  в режиме М5-М8, а также односторонней свивки на участке  $30d$  в режиме М1-М4:

$$N_{lim}(x) = (8,0 \cdot 10^{-5})x^3 - (6,0 \cdot 10^{-4})x^2 - 0,28x + 13,95; \quad (2)$$

– крестовой свивки на участке  $30d$  в режиме М1-М4:

$$N_{lim}(x) = (3,0 \cdot 10^{-4})x^3 - (1,28 \cdot 10^{-2})x^2 - 0,37x + 28,88; \quad (3)$$

– односторонней свивки на участке  $6d$  в режиме М5-М8:

$$N_{lim}(x) = (-4,0 \cdot 10^{-6})x^4 + (4,0 \cdot 10^{-4})x^3 - (8,7 \cdot 10^{-3})x^2 - (2,81 \cdot 10^{-2})x + 3,99. \quad (4)$$

На основе обоснованных критериев предельных состояний (таблица 4) разработан алгоритм предиктивного моделирования надежности, представленный в виде блок-схемы на рис. 6.

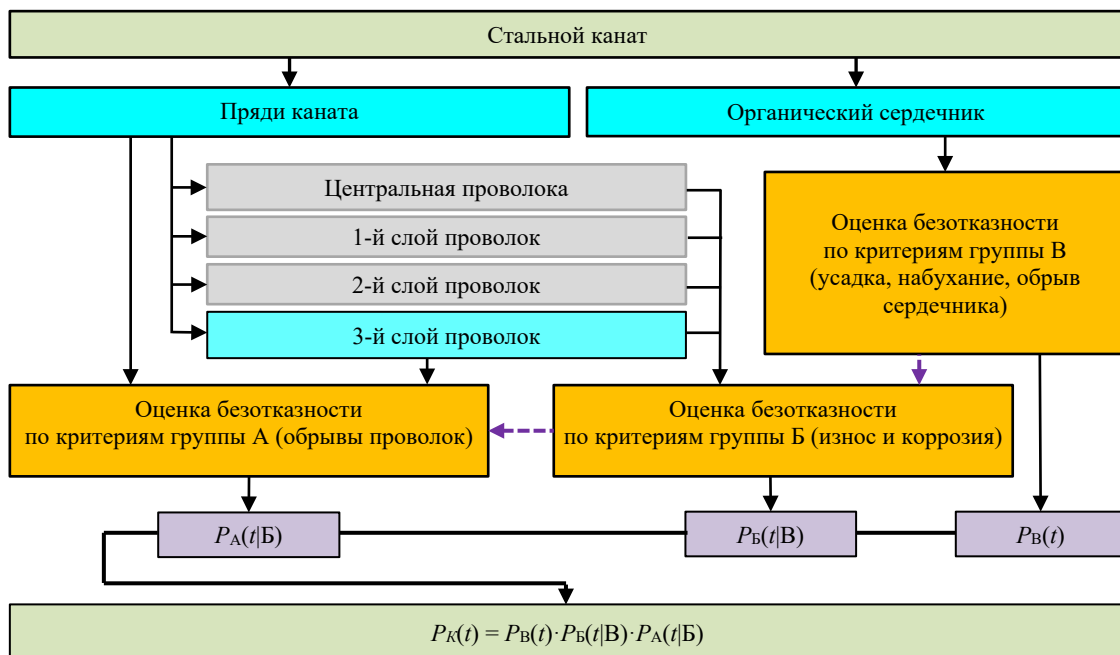


Рис. 6. Блок-схема модели прогнозирования надежности стального каната конструкции  $6 \times 36(1+7+7/7+14) + 1$  о.с. ЛК-РО по ГОСТ 7668

**Описание модели.** Далее представлено аналитическое описание моделей оценки безотказности по группам критериев В, Б, А согласно таблице 4 и блок схеме на рис. 6.

I. Оценка безотказности в соответствии с предельным состоянием группы В:

$$P_B(t) = \exp\left(-\left(\frac{t}{T_B}\right)^{\beta_B}\right), \quad (5)$$

где  $T_B$  — характеристический ресурс органического сердечника, ч;  $\beta_B$  — параметр формы определяющий интенсивность старения сердечника;

$$T_B = \frac{1}{k_{\text{дег.}}} \cdot \ln\left(1 - \frac{\varepsilon_{\text{lim}} \cdot E_B}{q}\right),$$

где  $k_{\text{дег.}}$  — постоянная процесса деградации сердечника, ч<sup>-1</sup>;  $E_B$  — модуль упругости сердечника, МПа;  $q$  — радиальное давление прядей, МПа.

Деформация сердечника под нагрузкой к моменту времени  $t$  согласно модели Кельвина-Фойгта:

$$\varepsilon(t) = \frac{q}{E_B} \left(1 - e^{-\frac{E_B \cdot t}{\eta_B}}\right),$$

где  $\eta_B$  — динамическая вязкость канатной смазки, МПа·ч;  $t$  — расчетное время, ч.

Для учета изменения структурной стабильности сердечника при оценке надежности по предельному состоянию группы Б предлагается определять коэффициент интенсификации износа при структурной нестабильности сердечника:

$$K_{\text{стр.}} = 1 + \frac{\varepsilon(t)}{\varepsilon_{\text{lim}}},$$

где  $\varepsilon_{\text{lim}}$  — предельно допустимая деформация.

II. Оценка безотказности в соответствии с предельным состоянием группы Б:

$$P_B(t) = \Phi\left(\frac{k_A \cdot A_0 - E[\Delta A_\Sigma(t)]}{\sqrt{D[\Delta A_\Sigma(t)]}}\right), \quad (6)$$

где  $k_A$  — коэффициент допустимой потери металлического сечения каната;  $A_0$  — номинальная площадь поперечно сечения металлической части каната, мм<sup>2</sup>;  $\Delta A_\Sigma$  — кумулятивная потеря площади поперечного сечения проволок внешних и внутренних слоев, мм<sup>2</sup>;  $E[\Delta A_\Sigma]$  и  $D[\Delta A_\Sigma]$  — математическое ожидание и дисперсия случайной величины кумулятивных потерь площади поперечного сечения металлической части каната.

Математическое ожидание кумулятивных потерь площади поперечного сечения металлической части каната определяется выражением:

$$E[\Delta A_\Sigma(t)] = E[\Delta A_{\text{внеш.}}(t)] + E[\Delta A_{\text{внут.}}(t)],$$

где  $\Delta A_{\text{внеш.}}(t)$  и  $\Delta A_{\text{внут.}}(t)$  — кумулятивная потеря площади поперечного сечения внешних и внутренних проволок к моменту времени  $t$ .

$$\Delta A_{\text{внеш.}}(t) = Z_{\text{внеш.}} \cdot f_{\Delta A}(E[h_{\text{внеш.}}(t)]) \quad \text{и} \quad \Delta A_{\text{внут.}}(t) = Z_{\text{внут.}} \cdot f_{\Delta A}(E[h_{\text{внут.}}(t)]),$$

где  $Z_{\text{внеш.}}$  и  $Z_{\text{внут.}}$  — количество проволок во внешнем и внутреннем слое;  $f_{\Delta A}(h(t))$  — функция, определяющая потерю площади в зависимости от величины износа  $h(t)$ .

Математические ожидания величины износа внешних и внутренних проволок определяет модель кинетики износа Арчарда с коррозионным аддитивом:

$$E(h_{\text{внеш.}}(t)) = \left(\frac{K_\omega \cdot p \cdot v}{H} \cdot K_{\text{стр.}} + v_{\text{кор.}}\right) \cdot t \quad \text{и} \quad E(h_{\text{внут.}}(t)) = (K_f \cdot K_{\text{стр.}} \cdot \sigma_{\text{кон.}} \cdot \delta + v_{\text{кор.}}) \cdot t,$$

где  $K_\omega$  — коэффициент интенсивности изнашивания (зависит от условий трения и смазки);  $p$  — среднее контактное давление в паре «проволока–ручей блока», МПа;  $v$  — средняя скорость относительного скольжения каната в ручье, мм/ч;  $v_{\text{кор.}}$  — средняя скорость коррозии для конкретной категории среды, мм/ч;  $H$  — твердость материала проволоки, МПа;  $K_f$  — коэффициент фреттинг-изнашивания проволок (определяется по справочным данным);  $K_{\text{стр.}}$  — коэффициент интенсификации износа при структурной нестабильности сердечника;  $\sigma_{\text{кон.}}$  — контактное напряжение между проволоками внутри пряди, МПа;  $\delta$  — амплитуда проскальзывания проволок при изгибе, мм;  $h_{\text{внеш.}}(t)$  — величина износа внешних проволок, мм;  $h_{\text{внут.}}(t)$  — величина износа внутренних проволок, мм;  $t$  — расчетное время, ч.

Среднюю скорость коррозии для конкретной категории среды предлагается определять согласно ГОСТ ISO 9226<sup>3</sup>.

Дисперсия кумулятивных потерь площади поперечного сечения металлической части каната определяется выражением:

$$D[\Delta A_{\Sigma}(t)] = D[A_{\text{внеш.}}(t)] + D[A_{\text{внут.}}(t)] + 2 \text{cov}[A_{\text{внеш.}}(t), A_{\text{внут.}}(t)].$$

Соответственно выражение включает дисперсии случайной величины потери площади поперечного сечения внешних и внутренних проволок:

$$D[\Delta A_{\text{внеш.}}(t)] = (E[\Delta A_{\text{внеш.}}(t)] \cdot v_{\text{внеш.}})^2 \quad \text{и} \quad D[\Delta A_{\text{внут.}}(t)] = (E[\Delta A_{\text{внут.}}(t)] \cdot v_{\text{внут.}})^2,$$

где  $v_{\text{внеш.}}$  — коэффициент вариации потери площади поперечного сечения внешних проволок;  $v_{\text{внут.}}$  — коэффициент вариации потери площади поперечного сечения внутренних проволок.

А также матрицу ковариации:

$$\text{cov}[A_{\text{внеш.}}(t), A_{\text{внут.}}(t)] = \rho \sqrt{D[\Delta A_{\text{внеш.}}(t)] \cdot D[\Delta A_{\text{внут.}}(t)]},$$

где  $\rho$  — коэффициент корреляции.

III. Оценка безотказности в соответствии с предельным состоянием группы А. Модель предполагает использовать распределение Пуассона, где интенсивность появления дефектов моделируется законом Вейбулла и возрастает по мере износа:

$$P_A(t) = \left[ \sum_{k=0}^{N_{lim}-1} \frac{(\Lambda(t))^k e^{-\Lambda(t)}}{k!} \right] \cdot \left[ e^{-\Lambda(t)} \left( 1 + \frac{\Lambda(t)}{n_{пр}} + \frac{\Lambda(t)^2}{2n_{пр}^2} \right) \right]^{n_{пр}}, \quad (7)$$

где  $N_{lim}$  — порог безопасности по количеству обрывов (уменьшающийся по мере износа);  $k$  — накопленное количество обрывов за время;  $\Lambda(t)$  — математическое ожидание количества обрывов к моменту времени  $t$ ;  $n_{пр}$  — количество прядей;  $t$  — расчетное время, ч.

Для учета прогнозируемого износа при оценке вероятности безотказной работы по предельным состояниям группы Б необходимо определять  $A(t)$  используя функцию  $f_{\Delta A}(h(t))$  (см. пункт II), а предельное число обрывов  $N_{lim}$  используя зависимости 1–4, предполагая  $x = 100 (A_0 - A(t)) / A_0$ .

Интенсивность появления обрывов с учетом накопления усталостных повреждений:

$$\Lambda(t) = \left( \frac{t}{\eta(A(t))} \right)^{\beta_A},$$

где  $\beta_A$  — параметр формы, определяющий интенсивность износа;  $\eta(A(t))$  — параметр масштаба, определяющий ресурс, ч.

Параметр масштаба определяет следующая зависимость:

$$\eta(A(t)) = \eta_0 \left( \frac{A(t)}{A_0} \right)^m,$$

где  $m$  — показатель чувствительности характеристического ресурса к перенапряжениям (показатель угла наклона кривой усталости);  $\eta_0$  — характеристический ресурс нового каната при номинальном сечении  $A_0$ , ч;  $A_0$  — номинальная площадь сечения проволоки стального каната без износа, мм<sup>2</sup>;  $A(t)$  — площадь сечения проволоки стального каната в момент времени  $t$ , мм<sup>2</sup>.

Параметр масштаба предполагает, что эквивалентное напряжение в сечении проволоки увеличивается по мере уменьшения площади поперечного сечения проволоки:

$$\sigma(t) = \frac{S}{A(t)},$$

где  $S$  — эквивалентная нагрузка на проволоку, Н.

Следует отметить, что в настоящей модели используется зависимость ресурса от площади поперечного сечения, которая соответствует модели Веллера:

$$\sigma^m \cdot N_{\text{циклов}} = \text{const}.$$

Поскольку напряжения  $\sigma(t)$  обратно пропорциональны площади поперечного сечения проволоки  $A(t)$ , то можно получить следующее выражение:

$$\left( \frac{1}{A} \right)^m \cdot N_{\text{циклов}} = \text{const}.$$

<sup>3</sup> ГОСТ ISO 9226–2022 Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная агрессивность атмосферы. Методы определения скорости коррозии стандартных образцов, используемых для оценки коррозионной агрессивности.

При этом показатель угла наклона кривой усталости  $m$  в данной модели эквивалентен показателю наклона кривой усталости материала проволоки.

$$\eta_0 = \frac{N_{\text{циклов}}}{\omega \cdot n_6 \cdot k_p},$$

где  $N_{\text{циклов}}$  — количество циклов до появления трещин,  $\omega$  — частота работы — количество циклов работы в час,  $\text{ч}^{-1}$ ;  $n_6$  — количество блоков;  $k_p$  — кратность работы за цикл.

Для прогнозирования количества циклов до появления трещин  $N_{\text{циклов}}$  предлагается использовать эмпирическую формулу профессора К. Фейрера:

$$\lg N_{\text{циклов}} = b_0 + \left( b_1 + b_3 \cdot \lg \frac{D}{d} \right) \cdot \left( \lg \frac{S}{d^2} - 0.41 \cdot \lg \frac{R_0}{1770} \right) + b_2 \cdot \lg \frac{D}{d},$$

где  $D/d$  — отношение диаметра роликов каретки к диаметру каната.  $S$  — натяжение каната, Н;  $R_0$  — маркировочная группа прочности проволоки, Н/мм<sup>2</sup>;  $b_0, b_1, b_2, b_3$  — эмпирические константы, учитывающие плотность свивки и форму проволок ( $b_0 = 2,634$ ;  $b_1 = 4,375$ ;  $b_2 = -1,72$ ;  $b_3 = -0,4$ ).

Согласно предложенной модели, прогнозируемый отказ каната является следствием параллельного развития нескольких механизмов деградации. Несмотря на то, что процессы износа, коррозии и усталости протекают в канате одновременно, в структуру модели заложен принцип последовательного соединения элементов системы. Модель предполагает, что работоспособность системы прекращается при достижении любого из трех установленных критериев отказа — «модель слабого звена». Взаимное влияние процессов деградации в предложенной модели реализовано посредством зависимых параметров и коэффициентов. Поэтому общую надежность стального каната определяет вероятность безотказной работы последовательной системы с динамически зависимыми параметрами:

$$R_K(t) = P_B(t) \cdot P_B(t|B) \cdot P_A(t|B), \quad (8)$$

где  $P_B(t)$  — вероятность безотказной работы в пределах заданного интервала времени  $t$  по критериям группы В;  $P_B(t|B)$  — вероятность безотказной работы в пределах заданного интервала времени  $t$  по критериям группы Б с учетом коэффициента, полученного на основе прогноза модели группы В;  $P_A(t|B)$  — вероятность безотказной работы в пределах заданного интервала времени  $t$  по критериям группы А с учетом прогноза зависимых параметров моделей группы Б.

**Пример расчета и верификация модели.** В качестве примера выполнен расчет вероятности безотказной работы стального каната при эксплуатации в составе механизма подъема порталного крана «Кировец» КПП 16/20 (группа режима работы М6). Расчетные параметры каната и режимов эксплуатации приведены в таблице 5. По результатам расчета построен график зависимости вероятности безотказной работы от времени, представленный на рис. 7.

Для верификации на графике отмечено расчетное значение медианного ресурса стального каната согласно ISO 16625 —  $T_{M6} = 3200$  ч при заданном режиме работы М6.

Таблица 5

Исходные данные для оценки безотказности стального каната

Вероятность безотказной работы	Обозначение параметра	Значение	Единица измерения
$P_B(t)$	$\beta_B$	3	—
	$q$	68	МПа
	$\eta_B$	0,36	МПа·ч
	$k_{\text{дег.}}$	0.0004	$\text{ч}^{-1}$
	$E_B$	110	МПа
	$\varepsilon_{\text{lim}}$	0,25	—
$P_B(t B)$	$\delta$	0,05	—
	$H$	5100	МПа
	$\sigma_{\text{кон.}}$	850	МПа
	$k_f$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	—
	$k_\omega$	$4,1 \cdot 10^{-8}$	—
	$k_A$	0,175	—
	$p$	7,0	МПа
	$v_{\text{вар.}}$	0,15	—
$P_A(t B)$	$\beta_A$	4	—
	$\eta_0$	3200	ч
	$A_0$	283,79	мм <sup>2</sup>
	$m$	6	—

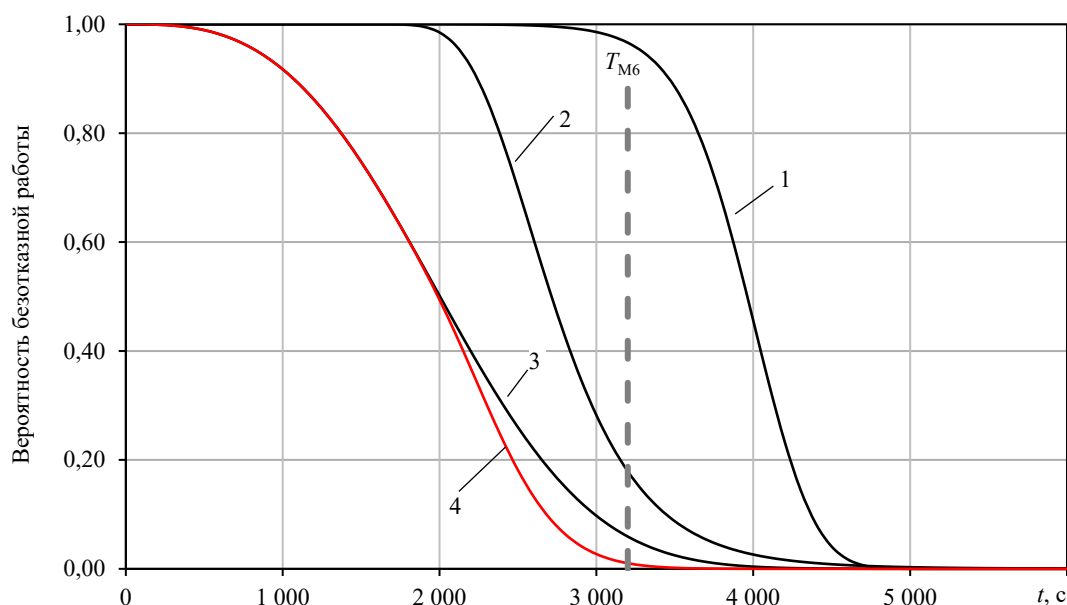


Рис. 7. Сравнение предиктивной оценки безотказности стального каната конструкции 6×36 ЛК-РО ГОСТ 7668-80 с расчетными значениями медианного ресурса

по ISO 16625: 1 — оценка безотказности по критериям группы А — зависимость  $P_A(t|B)$ ; 2 — оценка безотказности по критериям группы Б — зависимость  $P_B(t|B)$ ; 3 — оценка безотказности по критериям группы В — зависимость  $P_B(t)$ ; 4 — вероятность безотказной работы каната  $R_K(t)$ ;  $T_{M6}$  — ресурс стального каната в режиме М6, ч

**Обсуждение.** Анализ полученных результатов показывает, что предложенный комплекс моделей последовательно устраняет разрыв между теоретической оценкой надежности и регламентами эксплуатационной документации. Ключевой особенностью предлагаемой интерпретации отказов является учет синергетического взаимодействия нескольких механизмов деградации, формирующих интегральную картину изнашивания и повреждения. При моделировании живучести каната центральным методологическим вопросом выступает противоречие между физической природой процессов и используемой математической схемой. В рамках предложенной концепции прогнозируемый отказ каната трактуется как итог параллельного развития нескольких механизмов деградации — износа, коррозии и усталости — при том, что в структуру математической модели целенаправленно заложен принцип последовательного соединения элементов («модель слабого звена»). Такая постановка оправдана тем, что достижение любого из предельных критериев приводит к утрате работоспособности системы в целом.

Существенной особенностью модели является реализация взаимного влияния деградационных процессов через систему зависимых параметров и коэффициентов. Реологическая деградация сердечника и кинетика износа изменяют напряженно-деформированное состояние проволок, тем самым модифицируя темп накопления усталостных повреждений и перераспределение локальных нагрузок. В результате общая надежность каната определяется вероятностью безотказной работы последовательной системы с динамически зависимыми параметрами, что обеспечивает более высокую точность прогноза по сравнению с аддитивными подходами, игнорирующими межпроцессные связи.

В отличие от распространенных исследований, где факторы деградации трактуются как независимые переменные, в данной работе реализована концепция динамической зависимости параметров, отражающая реальную сопряженность механизмов. Показана применимость разработанного аппарата в качестве аналитического инструмента для проектных расчетов безотказности канатов с целью упреждения критических дефектов и оптимизации конструктивных решений. При этом гетерогенность используемого аппарата осложняет оценку суммарной погрешности стандартными методами — это диктует необходимость разработки специального критерия достоверности, учитывающего частные погрешности каждой составляющей модели и их возможную коррелированность.

**Заключение.** В ходе исследования разработана комплексная предиктивная математическая модель надежности стального каната, описывающая совместное накопление обрывов проволок, износ, атмосферную коррозию и реологическую деградацию сердечника. Предложенная иерархическая декомпозиция надежности каната обосновывает расчетную схему с взаимозависимыми параметрами, что позволяет учитывать синергетические эффекты деградации и снижать риск внезапного отказа. Сформированный расчетный аппарат интегрирует нормативные требования в процедуру прогноза. Верификация подтвердила согласованность прогнозных кривых безотказности с расчетными значениями медианного ресурса по ISO 16625; при этом оцениваемый медианный ресурс оказывается на 37 % более консервативным относительно результатов традиционных методик. Область применимости

ограничивается оценкой безотказности канатов двойной свивки с органическим сердечником по ГОСТ 7668–80 на стадии проектирования и предполагает наличие статистических параметров деградационных моделей, а также данных о прочности и нагруженности элементов каната. Дальнейшие исследования ориентированы на разработку и экспериментальную валидацию моделей для канатов различных конструктивных групп — включая учет специфики эксплуатации — и на их внедрение в инженерную практику для обоснованного выбора параметров и оптимизации регламентов технического обслуживания.

### Список литературы / References

1. Сухоруков В.В., Котельников В.С. Мониторинг состояния стальных канатов автоматизированными средствами технического диагностирования. *Безопасность труда в промышленности*. 2019;9:72–81. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-9-72-81>

Sukhorukov VV, Kotelnikov VS. Monitoring of Steel Ropes Condition with Technical Diagnostics Automated Means. *Occupational Safety in Industry*. 2019;9:72–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2019-9-72-81>

2. Хальфин М.Н., Аль-Джумаили Абдулсатар Х Шихан. К повышению надежности эксплуатации подъемных канатов в металлургическом производстве. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2015;3(184):68–71. <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-3-68-71>

Halfin MN, Al-Jumaili AKh. To Improve the Reliability Operation of Hoisting Ropes in the Metal Manufacturing. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasian Region. Technical Sciences*. 2015;3(184):68–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.17213/0321-2653-2015-3-68-71>

3. Хальфин, М.Н. К вопросу о выборе несущих канатов пассажирских канатных дорог / М.Н. Хальфин, А.А. Короткий, Б.Ф. Иванов. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2019;6:397–402.

Halfin MN, Korotkiy AA, Ivanov BF. To a Question of the Choice of the Bearing Ropes of Passenger Cableways. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2019;6:397–402. (In Russ.)

4. Короткий, А.А., Иванов Б.Ф., Панфилова Э.А. К вопросу о контроле фактического состояния стальных канатов пассажирских канатных дорог. *Научно-технический вестник Брянского государственного университета*. 2025;1:67–74. <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2025-11-01-67-74>

Korotkiy AA, Ivanov BF, Panfilova EA. On the Issue of Monitoring the Actual Condition of Steel Ropes of Passenger Cable Cars. *Scientific and Technical Journal of Bryansk State University*. 2025;1:67–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2025-11-01-67-74>

5. Короткий А.А., Панфилов А.В., Хван Р.В., Юсупов А.Р. Интегральный метод оценки дефектов на работоспособность стального каната с использованием искусственных нейронных сетей. *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2023;18:73–79.

Korotkiy AA, Panfilov AV, Khvan RV, Yusupov AR. Integral Method of Assessing Defects on the Operability of Steel Rope Using Artificial Neural Networks. *Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production*. 2023;18:73–79. (In Russ.)

6. Панфилов А.В., Юсупов А.Р., Короткий А.А., Иванов Б.Ф. О контроле технического состояния лифтовых канатов на основе технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения. *Advanced Engineering Research*. 2022;22(4):323–330. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-323-330>

Panfilov AV, Yusupov AR, Korotkiy AA, Ivanov BF. On the Control of the Technical Condition of Elevator Ropes Based on Artificial Intelligence and Computer Vision Technology. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2022;22(4):323–330. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-323-330>

7. 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;4:330–338.

Panfilov AV, Korotkiy AA, Ivanov BF, Yusupov AR. Control of Ropes during the Operation of Machines with Rope Traction. *Scientific and Technical Journal of Bryansk State University*. 2022;4:330–338. (In Russ.) <https://doi.org/10.22281/2413-9920-2022-08-04-330-338>

8. Кульчицкий А.А., Мансурова О.К., Николаев М.Ю. Распознавание дефектов грузоподъемных канатов металлургического оборудования оптическим методом с помощью нейронных сетей. *Черные металлы*. 2023;3:81–88. <https://doi.org/10.17580/chm.2023.03.13>

Kulchitskiy AA, Mansurova OK, Nikolaev MYu. Recognition of Defects in Hoisting Ropes of Metallurgical Equipment by an Optical Method Using Neural Networks. *Chernye Metally*. 2023;3:81–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/chm.2023.03.13>

9. Wahid Achraf, Mouhib Nadia, Sabah Fatima, Chakir Hamid, Ghorba MEI. Analytical Estimation of the Reliability of Wire Rope Based on Cumulative Damage. *MATEC Web of Conferences*. 2019;286(3):05001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928605001>

10. Wahid Achraf, Bassir Youssef, Mouhib Nadia, Hamid Chakir, Mohamed Elghorba. Analytical Approach for Damage Reliability Assessment of Wire Rope. *International Journal of Performability Engineering*. 2020;16(8):1151–1158. <https://10.23940/ijpe.20.08.p2.11511158>
11. Mouradi H, El Barkany Abdellah, Biyaali A. A Probabilistic Approach to Reliability Evaluation of Lifting Wire Ropes. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2014;9:923–928. <https://www.researchgate.net/publication/289468988>
12. Bassir Youssef, Wahid Achraf, Kartouni Abdelkarim, ELghorba Mohamed. Estimation of Wire Rope Reliability by Two Analytical Approach. *International Journal of Performability Engineering*. 2021;17(7):619. <https://doi.org/10.23940/ijpe.21.07.p6.619626>
13. Yifan Xia, Lu Deng, Xiangjun Chen, Tengyuan Liu, Zhendan Yang, Chunni Jia, et al. A Multi-Scale Finite Element Analysis Method for Dynamic Simulation of the Wire Rope. *Structures*. 2025;71:108136. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108136>
14. Yuchen Han, Jingshan Hao, Huadong Yong, Youhe Zhou. The Stick-Slip Bending Behavior of the Multilevel Helical Structures: A 3D Thin Rod Model with Frictional Contact. *International Journal of Solids and Structures*. 2024;303:113005. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2024.113005>
15. Salleh S, Abdullah MA, Abdulhamid MF, Tamin MN. Methodology for Reliability Assessment of Steel Wire Ropes under Fretting Fatigue Conditions. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2017;11(1):2488–2502. <https://doi.org/10.15282/jmes.11.1.2017.8.0229>
16. Yuxing Peng, Kun Huang, Chenbo Ma, Zhencai Zhu, Xiangdong Chang, Hao Lu, et al. Friction and Wear of Multiple Steel Wires in a Wire Rope. *Friction*. 2023;11:763–784. <https://doi.org/10.1007/s40544-022-0665-y>
17. Chun-ming Xu, Yu-xing Peng, Zhen-cai Zhu, Wei Tang, Kun Huang. Fretting Behaviors of Steel Wires with Tensile-Torsional Coupling Force under Different Wire Diameters and Crossing Angles. *Tribology Letters*. 2020;68:91. <https://doi.org/10.1007/s11249-020-01331-8>
18. Головин, В.П. Методы оценки влияния смазочного материала на износостойкость стального каната. *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2025;3:197–204. [https://doi.org/10.46973/0201-727X\\_2025\\_3\\_197](https://doi.org/10.46973/0201-727X_2025_3_197)
- Golovin VP. Methods for Evaluating the Effect of Lubricants on the Wear Resistance of Steel Rope. *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya (Vestnik RGUPS)*. 2025;3:197–204. (In Russ.) [https://doi.org/10.46973/0201-727X\\_2025\\_3\\_197](https://doi.org/10.46973/0201-727X_2025_3_197)
19. Han Peng, Yihao Zhang, Linjian Shangguan, Minzhang Zhao, Bing Li, Leijing Yang, Yannan Liu. Review of Failure Mechanisms of Steel Wire Ropes under Heavy-Load Conditions and the Anti-Friction Effects of Gel-Like Grease. *Gels*. 2025;11(11):900. <https://doi.org/10.3390/gels1111090>
20. Волоховский В.Ю., Воронцов А.Н., Шпаков И.И., Гончаров В.В. Анализ эксплуатационной надежности грузовых канатов заливочных кранов сталеплавильного производства. *Безопасность труда в промышленности*. 2020;5:7–16. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-7-16>
- Volokhovskiy VYu, Vorontsov AN, Shpakov II, Goncharov VV. Analysis of the Operational Reliability of the Hot-Metal Crane Cargo Ropes in Steelmaking. *Occupational Safety in Industry*. 2020;5:7–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2020-5-7-16>

**Об авторах:**

**Анатолий Анатольевич Котесов**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [a.kotesov@yandex.ru](mailto:a.kotesov@yandex.ru)

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*

**About the Author:**

**Anatoly A. Kotesov**, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Operation of Transport Systems and Logistics, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), [a.kotesov@yandex.ru](mailto:a.kotesov@yandex.ru)

**Conflict of Interest Statement:** the author declares no conflict of interest.

*The author has read and approved the final version of manuscript.*

**Поступила в редакцию / Received** 17.11.2025

**Поступила после рецензирования / Reviewed** 18.12.2025

**Принята к публикации / Accepted** 30.12.2025