

ТОМ 10, №1, 2026

eISSN 2541-9129

РЕЦЕНЗИРУЕМЫЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Безопасность техногенных и природных систем

Техносферная
безопасность /
Technosphere Safety

Машиностроение /
Machine Building

Химические технологии,
науки о материалах,
металлургия / Chemical
Technologies, Materials
Sciences, Metallurgy



www.bps-journal.ru
DOI 10.23947/2541-9129



Безопасность техногенных и природных систем

Safety of Technogenic and Natural Systems

Рецензируемый научно-практический журнал

eISSN 2541-9129

Издается с 2017 года

Периодичность – 4 выпуска в год

DOI: 10.23947/2541-9129

Учредитель и издатель — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), г. Ростов-на-Дону

Создан в целях освещения результатов исследований и реальных достижений по актуальным вопросам машиностроения, техносферной безопасности, современной металлургии и материаловедения. В журнале освещаются проблемы развития фундаментальных исследований и инженерных разработок в ряде важнейших областей технических наук. Одним из главных направлений деятельности журнала является интеграция в международное информационное пространство.

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень ВАК) по следующим научным специальностям:

- 2.1.16 – Охрана труда в строительстве (технические науки)
- 2.5.11 – Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки)
- 2.5.21 – Машины, агрегаты и технологические процессы (технические науки)
- 2.6.1 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)
- 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки)
- 2.6.17 – Металловедение (технические науки)
- 2.10.1 – Пожарная безопасность (технические науки)
- 2.10.2 – Экологическая безопасность (технические науки)
- 2.10.3 – Безопасность труда (технические науки)

<i>Регистрация:</i>	Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 66531 от 21 июля 2016 г., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
<i>Индексация и архивация:</i>	РИНЦ, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive
<i>Сайт:</i>	https://bps-journal.ru
<i>Адрес редакции:</i>	344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
<i>E-mail:</i>	vestnik@donstu.ru
<i>Телефон:</i>	+7 (863) 2–738–372
<i>Дата выхода №1, 2026 в свет:</i>	28.02.2026





Safety of Technogenic and Natural Systems

Bezopasnost' Tekhnogennykh i Prirodnykh Sistem

Peer-Reviewed Scientific and Practical Journal

eISSN 2541-9129

Published Since 2017

Periodicity – 4 issues per year

DOI: 10.23947/2541-9129

Founder and Publisher — Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Russian Federation

The journal is created in order to highlight the results of research and real achievements on topical issues of Mechanical Engineering, Technosphere Safety, Modern Metallurgy and Materials Science. The journal highlights the problems of the development of fundamental research and engineering developments in a number of important areas of technical sciences. One of the main activities of the journal is integration into the international information space.

The journal is included in the List of the leading peer-reviewed scientific publications (Higher Attestation Commission under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation), where basic scientific results of dissertations for the degrees of Doctor and Candidate of Science in scientific specialties and their respective branches of science should be published.

The Journal Publishes Articles in the Following Fields of Science:

- Labor protection in construction (Engineering Sciences)
- Ground Transport and Technological Means and Complexes (Engineering Sciences)
- Machines, Aggregates and Technological Processes (Engineering Sciences)
- Metallurgical Science and Heat Treatment of Metals and Alloys (Engineering Sciences)
- Powder Metallurgy and Composite Materials (Engineering Sciences)
- Materials Science (Engineering Sciences)
- Fire Safety (Engineering Sciences)
- Environmental Safety (Engineering Sciences)
- Occupational Safety (Engineering Sciences)

Registration: Mass Media Registration Certificate ЭЛ № ФС 77 – 66531 Dated July, 21, 2016, Issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media

Indexing and Archiving: RISC, CyberLeninka, CrossRef, DOAJ, Index Copernicus, Internet Archive

Website: <https://bps-journal.ru>

Address of the Editorial Office: 1, Gagarin Sq. Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation

E-mail: vestnik@donstu.ru

Telephone: +7 (863) 2–738–372

Date of Publication No.1,2026: 28.02.2026



Редакционная коллегия

Главный редактор

Месхи Бесарион Чохоевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Заместители главного редактора

Короткий Анатолий Аркадьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Азаров Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация)

Выпускающий редактор

Комахидзе Манана Гивиевна, кандидат химических наук, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Ответственные секретари

Хазанович Григорий Шнеерович, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Шевченко Надежда Анатольевна, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Абдрахманов Наиль Хадитович, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

Агеева Екатерина Владимировна, доктор технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация)

Агеев Евгений Викторович, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация)

Амосов Александр Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, Самарский государственный технический университет (Самара, Российская Федерация)

Баурова Наталья Ивановна, доктор технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (Москва, Российская Федерация)

Беспалов Вадим Игоревич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Булыгин Юрий Игоревич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Воронова Элеонора Юрьевна, доктор технических наук, доцент, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация)

Гапонов Владимир Лаврентьевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Гурова Оксана Сергеевна, доктор технических наук, доцент, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Гутаревич Виктор Олегович, доктор технических наук, доцент, Донецкий национальный технический университет (Донецк, Донецкая Народная Республика)

Деев Владислав Борисович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация)

Дорофеев Владимир Юрьевич, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный технический университет (НПИ) имени М. И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация)

Егоров Сергей Николаевич, доктор технических наук, профессор, Южно-Российский государственный технический университет (НПИ) имени М. И. Платова (Новочеркасск, Российская Федерация)

Еремеева Жанна Владимировна, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация)

Копчиков Вячеслав Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация)

Лагерева Александр Валерьевич, доктор технических наук, профессор, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация)

Лагерева Игорь Александрович, доктор технических наук, доцент, Брянский государственный университет имени академика И.Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация)

Манжула Константин Павлович, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербургский, Российская Федерация)

Мензелинцева Надежда Васильевна, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация)

Минко Всеволод Афанасьевич, доктор технических наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова (Белгород, Российская Федерация)

Москвичев Владимир Викторович, доктор технических наук, профессор, Красноярский филиал Федерального исследовательского центра «Информационных и вычислительных технологий» (Красноярск, Российская Федерация)

Носенко Алексей Станиславович, доктор технических наук, профессор, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация)

Плешко Михаил Степанович, доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС (Москва, Российская Федерация)

Пустовойт Виктор Николаевич, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Пушенко Сергей Леонардович, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Порошин Александр Алексеевич, доктор технических наук, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России (Балашиха, Российская Федерация)

Севастьянов Борис Владимирович, доктор технических наук, кандидат педагогических наук, профессор, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация)

Тюрин Александр Павлович, доктор технических наук, доцент, Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация)

Федок Роман Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация)

Хазанович Григорий Шнеерович, доктор технических наук, профессор, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Хафизов Ильдар Фанлиевич, доктор технических наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

Хафизов Фаниль Шамильевич, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация)

Чукарин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Editorial Board

Editor-in-Chief

Besarion Ch. Meskhi, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Deputy Chief Editors

Anatoliy A. Korotkiy, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Valery N. Azarov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation)

Executive Editor

Manana G. Komakhidze, Cand.Sci. (Chemistry), Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Executive Secretaries

Grigoriy Sh. Khazanovich, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Nadezhda A. Shevchenko, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Aleksandr A. Poroshin, Dr.Sci. (Eng.), All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Balashikha, Russian Federation)

Aleksandr N. Chukarin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Rostov State Transport University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Aleksandr P. Amosov, Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, Samara State Technical University (Samara, Russian Federation)

Aleksandr P. Tyurin, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

Aleksandr V. Lagerev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Ivan Petrovsky Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Aleksey S. Nosenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Shakhty Road Institute (branch) SRSPU (NPI) named after. M.I. Platova (Shakhty, Russian Federation)

Boris V. Sevastyanov, Dr.Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Pedagog.), Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

Ekaterina V. Ageeva, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russian Federation)

Eleonora Yu. Voronova, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Shakhty Road Institute (branch) SRSPU (NPI) named after. M.I. Platov (Shakhty, Russian Federation)

Evgeniy V. Ageev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Southwest State University (Kursk, Russian Federation)

Fanil Sh. Hafizov, Dr.Sci. (Eng.) Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Grigoriy Sh. Khazanovich, Dr.Sci. (Eng.), professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Igor A. Lagerev, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Ivan Petrovsky Bryansk State University (Bryansk, Russian Federation)

Ildar F. Hafizov, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Konstantin P. Manzhula, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Mikhail S. Pleshko, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation)

Nadezhda V. Menzelintseva, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Volgograd State Technical University (Volgograd, Russian Federation)

Nail Kh. Abdrakhmanov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russian Federation)

Natalya I. Baurova, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (Moscow, Russian Federation)

Oksana S. Gurova, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Roman S. Fediuk, Dr.Sci. (Eng.), professor, Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation)

Sergey L. Pushenko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Sergey N. Egorov, Dr.Sci. (Eng.), South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Platov (Novocherkassk, Russian Federation)

Vadim I. Bepalov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Viktor N. Pustovoit, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Viktor O. Gutarevich, Dr.Sci. (Eng.), Associate Professor, Donetsk National Technical University (Donetsk, Donetsk People's Republic)

Vladimir L. Gaponov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Vladimir V. Moskvichev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Krasnoyarsk Branch of the Federal Research Center for Information and Computational Technologies (Krasnoyarsk, Russian Federation)

Vladimir Yu. Dorofeev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Platov (Novocherkassk, Russian Federation)

Vladislav B. Deev, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation)

Vsevolod A. Minko, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (Belgorod, Russian Federation)

Vyacheslav G. Kopchenkov, Dr.Sci. (Eng.), Professor, North-Caucasus Federal University (Stavropol, Russian Federation)

Yuriy I. Bulygin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

Zhanna V. Ereemeva, Dr.Sci. (Eng.), Professor, National University of Science and Technology (MISiS) (Moscow, Russian Federation)

Содержание

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Матрица факторов пожарной опасности воздушных линий электропередачи как основа для моделирования риска 7
Д.А. Огурцов
- Комплексное управление пожарными и профессиональными рисками на предприятиях 19
Л.Ю. Фомичев, И.А. Минаева, С.П. Сухарский, С.В. Батманов, Я.М. Кузнецов

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Прогнозирование надежности стальных канатов на этапе проектирования 32
А.А. Котесов

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Локальный градиентный индикатор магнитной изменчивости при циклическом нагружении сталей 47
Д.Н. Шерматов, А.О. Борисов, В.А. Гафарова, И.Р. Кузеев

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Методология применения барьерно-ориентированного подхода для оценки рисков травмирования персонала на основе модели Хаддона 61
В.А. Гарт

Contents

TECHNOSPHERE SAFETY

- Matrix of Fire Hazard Factors for Overhead Power Lines as a Basis for Risk Modeling** 7
Denis A. Ogurtsov
- Integrated Management of Fire and Occupational Risks at Enterprises** 19
*Leonid Yu. Fomichev, Irina A. Minaeva, Stanislav P. Sukharsky, Sergei V. Batmanov,
Yaroslav M. Kuznetsov*

MACHINE BUILDING

- Predicting the Reliability of Steel Ropes at the Design Stage** 32
Anatoly A. Kotesov

CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY

- Local Gradient Indicator of Magnetic Variability under Cyclic Loading of Steels** 47
Dzhamshed N. Shermetov, Alexander O. Borisov, Victoria A. Gafarova, Iskander R. Kuzeev

TECHNOSPHERE SAFETY

- Methodology for Implementing a Barrier-Oriented Approach to Risk Assessment of Personnel Injuries Based on the Haddon Model** 61
Victoria A. Gart

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 614.841.3

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-7-18>

Матрица факторов пожарной опасности воздушных линий электропередачи как основа для моделирования риска

Д.А. Огурцов

Южно-Уральский государственный университет (Национальный исследовательский университет), г. Челябинск, Российская Федерация

✉ ogurtsovda@susu.ru

EDN: KSHRFD

Аннотация

Введение. Исследования пожарных рисков, связанных с воздушными линиями электропередачи (ВЛЭП), учитывают горючие материалы, рельеф и метеорологические условия. Изучены механизмы возникновения и распространения пожаров. На базе статистики инцидентов развивается количественное моделирование рисков. Однако сценарии опираются на произвольные или слабо формализованные наборы исходных факторов, что затрудняет формирование единых систем управления рисками. Представленная научная работа восполняет этот пробел. Ее цель — создание единой классификации факторов пожарной опасности ВЛЭП с учетом причины, среды и развития горения. На этой базе строится сценарная матрица риска для ВЛЭП.

Материалы и методы. Основа исследования — метод оценки пожарной опасности, при котором пожар от ВЛЭП рассматривается как результат взаимодействия трех ключевых компонентов: источника зажигания, горючей среды и условий распространения горения. Анализ литературы позволил провести декомпозицию этих элементов системы, классифицировать их и определить принципы систематизации.

Результаты исследования. Источники зажигания, горючая среда и условия распространения горения показаны как оси сценарной матрицы риска пожаров, связанных с ВЛЭП. Факторы классифицируются, структурируются и приводятся в виде авторских схем. Первая включает типы замыканий, нагрева и механизмы зажигания. Во второй четыре класса материалов дифференцируются по чувствительности к возгоранию. В третьей характеризуются три категории условий распространения огня. Математически представлены уровень риска и критическая энергия зажигания. Итоговая матрица агрегирует четыре класса материалов: высокочувствительные, среднечувствительные, слабочувствительные и специфичные. Условия распространения горения делятся на благоприятные, умеренные и неблагоприятные. С учетом источников зажигания (межфазные и однофазные) определяются уровни риска: низкий, средний, высокий и критический.

Обсуждение. Матрица объединила 24 типовых сценария исследуемой опасности (две группы источников × четыре класса материалов × три категории условий распространения). Пять сценариев (примерно 21 %) — критические. Как правило, они возникают при сочетании высокоэнергетических аварийных режимов, высоко- и среднечувствительных материалов и неблагоприятных метеоусловий. Матрицу можно задействовать при переходе от качественного описания обстановки на ВЛЭП к количественной оценке вероятности пожара и его последствий. Новация будет полезна при моделировании инцидентов на ВЛЭП, доработке мер безопасности, улучшении оценки рисков. Сценарии можно ранжировать по значимости, что позволит более рационально распределять ресурсы на защитные мероприятия.

Заключение. Новый подход, в отличие от традиционного, позволяет преодолеть ограничения фрагментарной оценки опасности и системно анализировать сценарии пожаров, связанных с ВЛЭП. Благодаря этому можно обосновать решения по модернизации и усилению защиты отдельных участков сети, то есть ориентировать инвестиции на элементы инфраструктуры и типовые ситуации, от которых в большей степени зависят пожарные риски. В будущих исследованиях по этой теме предполагается:

- дополнить статистику аварий и объем экспериментальных данных по энергетическим характеристикам источников зажигания;
- представить количественную параметризацию функции, которая представляет уровень риска для каждого сценария;
- установить численные пороги для четырех уровней риска.


Ключевые слова: воздушная линия электропередачи, ВЛЭП, источник зажигания, горючая среда, условия распространения горения, матрица риска возгорания ВЛЭП

Благодарности. Автор выражает благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Огурцов Д.А. Матрица факторов пожарной опасности воздушных линий электропередачи как основа для моделирования риска. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(1):7–18. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-7-18>

Original Theoretical Research

Matrix of Fire Hazard Factors for Overhead Power Lines as a Basis for Risk Modeling

Denis A. Ogurtsov 

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

✉ ogurtsovda@susu.ru

Abstract

Introduction. Studies of fire risks associated with overhead power lines (OHPLs) consider combustible materials, terrain, and meteorological conditions. The mechanisms of fire occurrence and spread have been studied, and quantitative risk modeling is being developed based on incident statistics. However, these scenarios rely on arbitrary or poorly defined sets of initial factors, making it difficult to create unified risk management systems. This scientific work aims to fill this gap by creating a unified classification of fire hazard factors for overhead power lines that takes into account the causes, environment, and development of fires. A scenario-based risk matrix for OHPLs is built on this foundation.

Materials and Methods. The basis of the study was a method for assessing fire risk, which considers fire from overhead power lines as a result of the interaction between three key components: the ignition source, combustible medium and fire propagation conditions. Through an analysis of the relevant literature, these components were broken down, classified, and the principles for systematizing them were identified.

Results. Ignition sources, combustible medium, and fire propagation conditions were presented as axes in the scenario matrix of fire risk associated with overhead power lines. These factors were classified and structured using author-created diagrams. The first one included the types of short circuits, heating, and ignition mechanisms. In the second, four classes of materials were differentiated by their sensitivity to fire. The third one described three categories of fire propagation conditions. The risk level and critical ignition energy were mathematically represented. The final matrix aggregated four classes of material: high-sensitive, medium-sensitive, low-sensitive, and specific. Fire spread conditions were divided into favorable, moderate, and unfavorable. Taking into account the ignition sources (interphase and single-phase), the risk levels were determined: low, medium, high, and critical.

Discussion. The matrix combined 24 typical scenarios of the studied hazard (two groups of sources × four classes of materials × three categories of propagation conditions). Five scenarios (approximately 21%) were critical. As a rule, they occurred with a combination of high-energy emergency conditions, high- and medium-sensitive materials and adverse weather conditions. The matrix can be used in the transition from a qualitative description of OHPLs to a quantitative assessment of the probability of a fire and its consequences. This innovation will be beneficial for modeling OHPL incidents, refining safety measures, and improving risk assessment. Scenarios can be ranked based on importance, allowing for a more efficient allocation of resources for protective measures.

Conclusion. The new approach, in contrast to the traditional one, makes it possible to overcome the limitations of the fragmented hazard assessment and systematically analyze fire scenarios related to overhead power lines. This allows us to justify decisions on modernizing and strengthening the protection of individual network sections, i.e., to focus investments on infrastructure elements and typical situations that fire risks depend on to a greater extent. Future research in this area is expected to:

- supplement accident statistics and the amount of experimental data on the energy characteristics of ignition sources;
- provide a quantitative parameterization of the function that represents the risk level for each scenario;
- set numerical thresholds for four risk levels.

Keywords: overhead power line, OHPL, ignition source, flammable environment, fire propagation conditions, OHPL fire risk matrix

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For Citation. Ogurtsov DA. Matrix of Fire Hazard Factors for Overhead Power Lines as a Basis for Risk Modeling. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(1):7–18. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-7-18>

Введение. В фокусе внимания исследователей долгое время остаются вопросы оценки и снижения пожарного риска для протяженных линейных объектов электросетевой инфраструктуры, в частности воздушных линий электропередачи (ВЛЭП). Актуальность проблемы обусловлена частотой и масштабами природных пожаров. Кроме того, нарушение целостности ЛЭП — одна из базовых уязвимостей энергосистем [1]. В данном случае горючие материалы, рельеф, метеорологические условия формируют комплекс опасных факторов, который следует детально рассмотреть, отдельно от общих моделей ландшафтных пожаров.

За рубежом в пожароопасных регионах энергокомпания вынуждены задействовать превентивные отключения [2] и иные ограничения (в том числе PSPS¹), а также оперативно модернизировать инфраструктуру для снижения вероятности возгораний [3].

Согласно данным Федерального агентства лесного хозяйства, в 2019 году в России из-за линейных объектов (включая линии электропередачи) возникли 132 пожара². В первом полугодии 2023 года в Дальневосточном федеральном округе переход с линейных объектов выделили как самостоятельную причину 6,2 % числа пожаров (3,4 % по площади)³.

В пожароопасный период (апрель – октябрь) 2018 года в Челябинской области зарегистрировали 648 лесных пожаров. Из них 19 (2,9 %) связаны с линиями электропередачи [4].

Нередко ландшафтные пожары возникают вследствие замыканий на ЛЭП и быстро распространяются из-за жары и сильного ветра. Такой случай зафиксировала Авиалесоохрана в Усть-Донецком районе Ростовской области (пожар на землях сельхозназначения 15 августа 2022 года⁴).

Вопросы пожарной безопасности ВЛЭП исследуются по нескольким направлениям. Во-первых, активно изучаются механизмы возникновения и распространения пожаров вблизи линий электропередачи. При этом учитываются влияние конструктивных особенностей опор, проводов и изоляторов [5], а также режимов их эксплуатации [6]. Во-вторых, оцениваются погодные и климатические условия, способствующие возникновению и усилению горения (высокая температура воздуха, пониженная влажность, сильный и порывистый ветер, длительные периоды без осадков и др.) [7], а также взаимодействие этих факторов с топографией и характером растительного покрова [8]. В-третьих, развивается количественное моделирование пожарного риска, которое опирается на статистику происшествий [9]. Для этого задействуют вероятностные методы, сценарный анализ и различные подходы к ранжированию участков ВЛЭП по степени опасности [10].

В отечественной и зарубежной литературе рассматривались отдельные группы факторов риска. Детально классифицированы и описаны такие источники зажигания вблизи ВЛЭП, как:

- дефекты оборудования;
- внешние механические воздействия;
- атмосферные явления;
- человеческий фактор.

Разработаны и применяются различные подходы к оценке пожарной опасности растительного покрова. Принимаются во внимание, например, индекс горимости, фитомасса, степень иссушенности [11]. Кроме того, предлагаются модели, учитывающие влияние рельефа, лесистости, минерализованных полос, расстояние до инфраструктурных объектов и населенных пунктов [12]. Однако эти и другие факторы, как правило, рассматриваются разрозненно, в рамках частных задач (например, построение карт пожарной опасности, прогнозирование распространения огня или планирование мероприятий по расчистке просек), вне интеграции в единую систему «источник зажигания (или инициирующее воздействие) – горючая среда – условия распространения горения» (ИЗ – ГС – УРГ).

Отдельное направление исследований связано с прогнозированием развития пожароопасных ситуаций вдоль трасс ВЛЭП [13]. В таких работах обычно выделяется ограниченное число типовых сценариев, для которых анализируются вероятности реализации и возможные последствия. В качестве примеров можно привести возгорание под проводами при падении деревьев, возгорание от искрения на опоре в условиях высокой сухости растительности, переход верхового пожара через просеку и т. п. В перечисленных случаях для принятия управленческих решений применяются сценарные матрицы, карты рисков и другие инструменты визуализации. Однако такие сценарные описания нередко опираются на произвольно выбранные или слабо формализованные наборы исходных факторов, что затрудняет их сопоставление и включение в единые системы управления рисками на уровне энергосистемы или региона.

¹ От англ. public safety power shutoff — отключение электроэнергии в целях общественной безопасности.

² Актуальная сводка пожароопасного периода: 98 процентов лесных возгораний возникают по вине человека. URL: <https://rosleshoz.gov.ru/news/federal/aktualnaya-svodka-pozharoопасного-perioda-98-protsentov-lesnykh-vozhgoraniy-voznikayut-po-vine-cheloveka-n4696> (дата обращения: 18.10.2025).

³ Анализ причин возникновения лесных пожаров на территории Дальневосточного федерального округа. URL: <https://rosleshoz.gov.ru/news/dfo/analiz-prichin-voznikoveniya-lesnykh-pozharov-na-territorii-dalnevostochnogo-federalnogo-okruga-dfo-22041> (дата обращения: 18.10.2025).

⁴ Лесной пожар в Усть-Донецком районе Ростовской области возник от перехода огня ландшафтного пожара на землях сельхозназначения. URL: <https://aviales.ru/popup.aspx?news=7474> (дата обращения: 18.10.2025).

Таким образом, при значительном объеме эмпирических данных, частных классификаций и моделей в открытом доступе нет единой, систематизированной классификации факторов, определяющих пожарную опасность ВЛЭП. Очевидна актуальность такой системы, построенной в соответствии с трехкомпонентной структурой (ИЗ – ГС – УРГ) и изначально ориентированной на использование в рамках сценарного анализа. К тому же все еще не разработан общепринятый формализованный подход к построению сценарной матрицы риска, в которой ИЗ, ГС и УРГ были бы представлены как совокупность типовых факторов, отражающих наиболее вероятные и опасные ситуации. Пока же в литературе элементы классификации, сценарного описания и количественного моделирования присутствуют фрагментарно и разрозненно. Авторы акцентируют внимание, например, на:

- источниках зажигания [14];
- характеристиках горючей среды [15];
- условиях распространения пожара [16];
- методах вероятностной оценки и ранжирования участков ВЛЭП [17].

При этом нет целостной методической основы, включающей классификацию факторов, логику их комбинации в сценарии и связь сценариев с количественной оценкой риска. Представленная научная работа призвана восполнить данный пробел. Ее цель — создание единой классификации факторов, влияющих на пожарную опасность ВЛЭП, описанной в терминах инициирующих воздействий, горючей среды и условий развития горения. Еще одна новация предложенного решения — построение формализованной сценарной матрицы риска для участков линий электропередачи. При достижении поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ подходов к описанию и классификации факторов пожарного риска (главным образом вблизи ВЛЭП);
- формирование классификации факторов по трем группам (ИЗ, ГС, УРГ) с указанием их взаимосвязей;
- выявление параметров и классификация горючей среды в зоне возможного воздействия источника зажигания;
- определение и классификация условий воспламенения и распространения горения (УРГ);
- обобщение результатов классификации в конечное число репрезентативных состояний;
- построение сценарной матрицы риска.

Материалы и методы. Основой настоящего исследования послужил метод оценки пожарной опасности, при котором возникновение пожара от ВЛЭП рассматривается как результат взаимодействия трех ключевых компонентов: ИЗ, ГС и УРГ. Это общепризнанный подход в оценке комплексных угроз. Так, для определения надежности линий электропередачи в условиях множественных стихийных бедствий применяются многокритериальные решения. Например, комбинируют методы анализа иерархий и весовых коэффициентов энтропии (АНР⁵ – EWM⁶) [18]. Другой пример сложной методологии — TOPSIS⁷. Этот подход применяют в первую очередь к ранжированию рисков, которые создают различные виды стихийных бедствий для линий электропередачи. Отметим, что метод полезен для управления ресурсами на основе статистики последствий, но не причин [9].

Методология работы заключалась в последовательной декомпозиции и классификации названных выше компонентов. Для групп факторов определили ключевые принципы систематизации.

Для источников зажигания классификация строилась по анализу их физической природы, причин возникновения и агрегировалась по ключевым физическим механизмам теплового воздействия на горючую среду.

Классификация для горючей среды базировалась на ее пирологических свойствах и расположении относительно конструктивных элементов ВЛЭП.

Для условий распространения горения использовалась признанная в мировой пирологии концепция «треугольника пожарного поведения». В рамках данной статьи речь идет о погоде, топографии и характеристике горючих материалов.

Результаты исследования. Для реализации цели заявленного исследования проводился анализ литературы, который позволил структурировать и представить в виде авторских схем классификации источников зажигания, горючей среды и условий распространения горения. Каждый из этих факторов стал осью итоговой сценарной матрицы риска.

Классификация источников зажигания. Отметим разнообразие причин возгораний, связанных с ВЛЭП. В их числе — нарушения правил эксплуатации электрических сетей (износ, человеческий фактор) и явления вероятностного характера (климатические условия). Однако для количественного моделирования риска первопричины событий (например, падение дерева или пробой изолятора) менее важны, чем физические характеристики самого процесса зажигания. Поэтому с научной точки зрения более качественной представляется система, основанная на доминировании физических механизмов теплопередачи и характере энергетического воздействия.

⁵ От англ. analytical hierarchy process.

⁶ От англ. entropy weighting coefficient method.

⁷ От англ. technique for order preference by similarity to ideal solution — техника упорядочения предпочтений по сходству с идеальным решением.

В предложенной классификации источники зажигания относят к одному из двух классов, соответствующих аварийным режимам работы. Речь идет о межфазных замыканиях (МФЗ) и однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ). Другие виды аварийных режимов работы (перегрузки или несимметричные режимы) обычно приводят к распределенному нагреву проводников по всей длине, а не к концентрированному и высокотемпературному выделению энергии в одной точке, которого достаточно для зажигания горючих материалов.

Данная классификация позволяет четко разграничить источники зажигания по типу и механизму нагрева (рис. 1).



Рис. 1. Классификация источников пожарной опасности ВЛЭП

I. Межфазные замыкания возникают при следующих обстоятельствах:

- схлестывание проводов из-за ветра;
- оледенение проводов;
- падение на провода деревьев и других предметов.

В таких случаях фиксируется интенсивный нагрев до 4000–10000 °С и выше. Сила тока резко увеличивается в 10–100 раз по сравнению с номинальным режимом [7]. При этом образуется электрическая дуга — плазменный канал с высокой температурой и интенсивным тепловыделением. Кратковременное, но чрезвычайно мощное выделение энергии порождает вторичные источники зажигания — раскаленные капли металла. Это обстоятельство обуславливает высокую вероятность возгорания сухой лесной подстилки или травы.

Риск схлестывания проводов при сильном ветре можно количественно оценить с помощью моделей, основанных на нелинейных уравнениях колебаний проводников. Такие системы позволяют в реальном времени определять вероятность возникновения опасного сближения фаз [8].

При этом от величины тока и длительности короткого замыкания напрямую зависит уровень пожарной опасности: низкий, средний или высокий [5]. Экспериментальные исследования подтверждают, что для неизолированных алюминиевых проводов существуют конкретные диапазоны пожароопасных токов короткого замыкания. Так, проводу сечением 25 мм² соответствует диапазон 120–180 А [13]. К этому же классу относятся двухфазные замыкания на землю (ДЗЗ), возникающие при падении на землю проводов двух или трех разных фаз. Несмотря на то что ток идет через землю, электротехнически такой режим эквивалентен межфазному короткому замыканию, так как характеризуется большими токами КЗ. Физика зажигания в этом режиме идентична МФЗ: в точках контакта проводов с землей возникают мощные электрические дуги. В результате металл плавится, и раскаленные капли поджигают горючие материалы.

II. Однофазные замыкания на землю обуславливают устойчивое термохимическое воздействие на горючие материалы. Это наиболее распространенная и основная причина пожаров. Аварийный режим характеризуется продолжительным и, как правило, неконтролируемым выделением тепловой энергии.

В сетях 6–35 кВ, работающих с изолированной нейтралью, токи ОЗЗ незначительны (как правило, до 10 А) [6]. Они не вызывают мгновенных разрушений элементов и оборудования, что позволяет длительно (несколько часов) эксплуатировать сеть в аварийном режиме без отключения потребителей. За это время выявляются и устраняются повреждения.

Этот класс объединяет все сценарии, при которых проводник воздушной линии электропередачи (ВЛЭП) входит в длительный контакт с заземленным горючим объектом.

В литературе выделяют два типа замыканий на землю [14]. Первый — металлические. Речь идет о случаях прямого соединения проводников с землей с пренебрежимо малым сопротивлением в месте контакта. Примеры:

- обрыв и падение провода на траверсу;
- падение на корпус трансформаторной подстанции и другие металлические объекты в охранной зоне ЛЭП.

Замыкания через высокое переходное сопротивление (второй тип) возникают при падении проводов на сухую траву, а также если оборвавшийся провод касается дерева, деревянной опоры. К этому же типу относят контакт через поврежденный или загрязненный изолятор.

Механизм теплового воздействия в месте контакта фазы одинаков для обоих типов ОЗЗ. В точке касания с землей происходит резистивный (Джоулев) нагрев за счет прохождения емкостного тока замыкания через переходное сопротивление в точке контакта. Отсутствие дугового разряда высокой энергии делает этот процесс более медленным, чем в резистивно-компенсированных сетях. Тем не менее возникающая кондуктивная теплопередача от нагретого проводника к окружающим горючим материалам обеспечивает их постепенный нагрев до температуры воспламенения, т. е. обуславливает риск возгорания. Распространение тока замыкания по земле вблизи места повреждения создает локальные зоны нагрева, что также способствует возникновению пожара. При этом тепловыделение определяется произведением квадрата тока на сопротивление согласно закону Джоуля – Ленца.

Для металлических замыканий характерны значения переходного сопротивления от 0,1 до 10 Ом, тогда как при замыканиях через высокое сопротивление (падение провода на сухую траву, контакт с древесиной) речь может идти о сотнях и тысячах омов. При относительно небольших токах ОЗЗ определяющим фактором тепловыделения становится именно уровень переходного сопротивления. Увеличение сопротивления в сотни раз пропорционально увеличивает мощность нагрева, что создает локальные зоны интенсивного тепловыделения, способные вызвать воспламенение горючих материалов даже при умеренных токах замыкания.

Таким образом, все многообразие первопричин было сгруппировано в два типовых физических механизма, которые станут первым измерением (осью) в итоговой сценарной матрице риска.

Классификация горючей среды (ГС). Как было установлено ранее, одно из трех обязательных условий пожара при эксплуатации ВЛЭП – горючая среда (ГС). Это совокупность:

- горючих материалов природного и антропогенного происхождения в пределах охранной зоны ВЛЭП;
- элементов конструкции воздушной линии, которые могут воспламениться от термоэлектрических источников зажигания.

При количественной оценке вероятности воспламенения учтем ключевые пирологические параметры, определяющие чувствительность к зажиганию. Так, от типа и влагосодержания горючего материала напрямую зависит минимальная критическая энергия зажигания (воспламенения) $Q_{\text{заж.}}$, которая определяется уравнением теплового баланса:

$$Q_{\text{заж.}} = m \cdot c_p \cdot (T_{\text{заж.}} - T_0) + m_{\text{влаги}} \cdot L_{\text{исп.}}, \quad (1)$$

где m — масса нагреваемого материала, кг; c_p — теплоемкость горючих материалов, кДж/(кг·К); $T_{\text{заж.}}$ — температура зажигания (воспламенения); T_0 — начальная температура; $m_{\text{влаги}}$ — масса влаги в материале, кг; $L_{\text{исп.}}$ — теплота испарения воды.

При увеличении влагосодержания существенно возрастают энергетические условия воспламенения. Экспериментальные исследования показывают, что при росте влажности природных горючих материалов (ПГМ) с 10 % до 30 % требуемая минимальная тепловая нагрузка увеличивается с 20 кВт/м² до 35–40 кВт/м², что соответствует возрастанию критической энергии воспламенения примерно в 1,75–2 раза [15].

Дополнительный вклад в рост энергетического барьера вносят затраты энергии на испарение влаги (удельная теплота испарения воды — 2,26 МДж/кг). Для живой растительности с влагосодержанием 100–300 % относительно сухой массы воспламенение практически не реализуется при тепловых потоках менее 35 кВт/м².

Таким образом, при сравнении с сухими мелкодисперсными материалами (влажность 10–15 %) энергетический барьер воспламенения для увлажненных и живых ПГМ возрастает ориентировочно в 3–10 раз, что согласуется с экспериментальными данными о влиянии влагосодержания на воспламеняемость растительных материалов [16].

Исходя из этого, предлагается следующая классификация горючей среды (рис. 2).

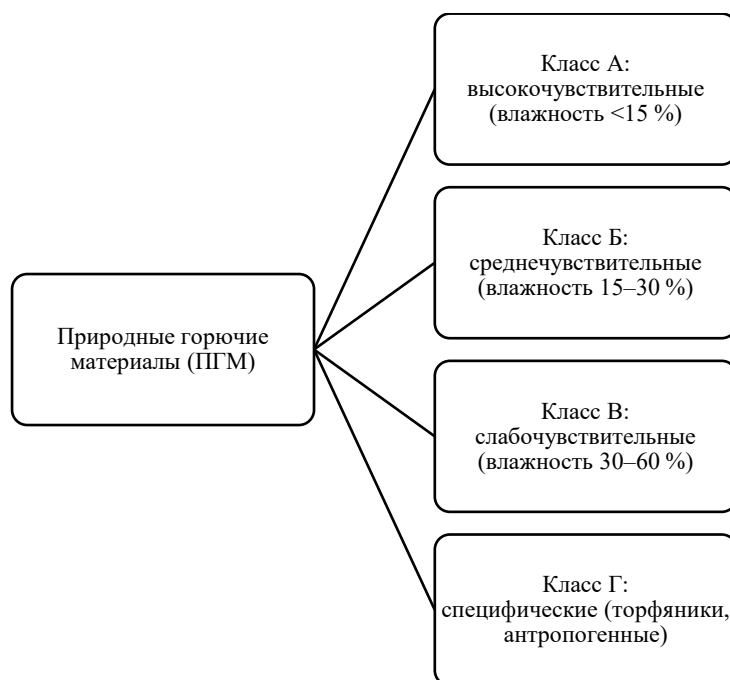


Рис. 2. Классификация горючих материалов в зоне ВЛЭП

Класс А. Высокочувствительные ПГМ. Данный класс характеризуется минимальным влагосодержанием (менее 15 %) и, как следствие, низкой критической энергией воспламенения (менее 1 кДж). В эту группу входят наиболее пожароопасные материалы: сухая трава и хвоя (опавшая в текущем году), мхи при длительной засухе, а также органические накопления на изоляторах (помет, пух) и материалы птичьих гнезд.

Класс Б. Среднечувствительные ПГМ. Этот класс объединяет материалы с умеренным влагосодержанием (15–30 %), что повышает требуемую энергию воспламенения до 1–10 кДж. Примеры: лесная подстилка умеренной влажности, давно опавшая хвоя прошлых лет, сухие ветви диаметром до 5 см и древесина опор влажностью 20–30 %.

Класс В. Слабочувствительные ПГМ. В них содержится 30–60 % влаги. Согласно уравнению (1), в этом случае для воспламенения нужна высокая энергия (10–50 кДж). Слабочувствительные ПГМ — это влажная лесная подстилка, живая хвоя и листва в кронах деревьев, подрост хвойных пород и древесина опор влажностью 30–50 %.

Класс Г. Специфические горючие материалы. Пожарная опасность торфяников, конструкционной древесины, горючего мусора определяется не только влагосодержанием (как в классах А, Б, В), но и специфическими свойствами: структурными особенностями, химическим составом, способностью к самоподдерживающемуся горению.

Элементы данного класса качественно неоднородны и демонстрируют высокую восприимчивость к термическому воздействию — длительному при ОЗЗ и кратковременному от капель раскаленного металла. Это объясняется либо низкой энергией воспламенения (пропитанная антипиреном древесина, сухой мусор), либо способностью к самоподдерживающемуся горению после зажигания (торфяники). Как следствие, несмотря на неоднородность, такие материалы объединяют для целей сценарного моделирования риска.

Данная классификация, основанная на пирологических свойствах и чувствительности к термоэлектрическим воздействиям, позволяет перейти от обобщенного понятия «горючая среда» к четырем классам. Это необходимо для построения сценарной матрицы риска и позволяет количественно оценить вероятность воспламенения ($P_{\text{восп}}$) при различных аварийных режимах в зависимости от текущего состояния ГС.

Классификация условий распространения горения (УРГ). Рассмотрим ситуацию с таким начальным событием, как возникновение очага возгорания от воздушной линии электропередачи. Ущерб и масштаб последствий определяются распространением огня от очага. Условия, которые регулируют этот процесс, формируют третий ключевой компонент системы пожарной опасности.

Под УРГ в рамках настоящего исследования понимается совокупность факторов окружающей среды, определяющих скорость, интенсивность, траекторию фронта пожара и возможность его перехода между различными ярусами горючей среды. Важно отметить, что вероятность воспламенения и распространения огня зависят от ряда факторов (например, ветер, влажность). Однако в данном разделе они рассматриваются с точки зрения воздействия на уже существующий, развивающийся пожар. Классификация УРГ необходима для моделирования сценариев пожара и оценки потенциального ущерба.

В пирологии широко используется модель, которую называют треугольником пожарного поведения. В рамках представленного исследования принимается концепция, согласно которой характер и динамика распространения пожара определяются взаимодействием трех групп факторов: погодных условий, топографии и характеристик горючих материалов [11]. При этом учитываются:

- скорость ветра и влажность воздуха;
- форма рельефа;
- объем горючего материала, его горизонтальное и вертикальное расположение (рис. 3).

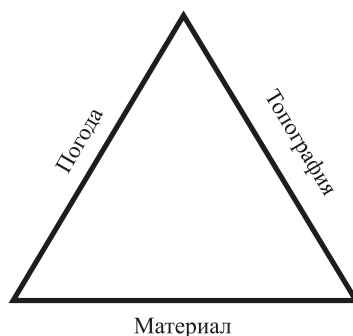


Рис. 3. Треугольник пожарного поведения

Для конкретного участка ВЛЭП топография учтена при проектировании и не требует включения в сценарную матрицу как переменная. Для критических участков (крутые склоны) используют повышающие коэффициенты риска. Характеристики материалов также отражены в классификации горючей среды:

- материалы класса А обеспечивают высокую скорость низового пожара;
- материалы класса Б формирует «лестницу» для верхового пожара.

Динамически меняется лишь погода, и она требует оперативной оценки. Ветер и влажность обладают максимальным прогностическим потенциалом и легко измеряются.

Класс пожарной опасности (КПО) по условиям погоды — интегральный индикатор. В России используется комплексный показатель Нестерова с градацией от I (отсутствие опасности) до V (чрезвычайная опасность). КПО напрямую связан с влагосодержанием мелких горючих материалов. Так, при КПО V влажность снижается до 10–15 % (класс А горючей среды), при КПО III составляет 20–30 % (класс Б).

Скорость ветра около 10 м:

– увеличивает вероятность аварийных режимов (схлестывание проводов при МФЗ, контакт с растительностью при ОЗЗ);

- усиливает тепловыделение при воспламенении;
- определяет скорость фронта при распространении.

Скорость ветра — стабильно измеряемый и прогнозируемый параметр. Для сценарного анализа установлено пороговое значение 5 м/с. Ниже этого показателя пожар распространяется за счет радиационного прогрева с умеренной скоростью. Более высокая скорость обуславливает конвективный теплоперенос с наклоном пламени, перенос искр и вторичные очаги [12].

Итак, система факторов треугольника пожарного поведения сводится к двум ключевым динамическим параметрам — КПО и скорости ветра. Эта редукция обоснована физически, статистически и практически.

Класс пожарной опасности (КПО) по условиям погоды определяет пирологическую готовность природных горючих материалов. Эта интегральная характеристика отражает их способность к воспламенению и поддержанию горения. Она зависит от типа материала, его влагосодержания и тепловых свойств.

Скорость ветра, в свою очередь, определяет динамику распространения пламени и формирование вторичных очагов.

С точки зрения статистики оба параметра являются надежными индикаторами пожарной опасности, а с практической точки зрения их использование обосновано высокой доступностью и прогностической достоверностью данных метеонаблюдений.

КПО и скорость ветра определяют характер условий распространения горения (УРГ) для сценарной матрицы (рис. 4).

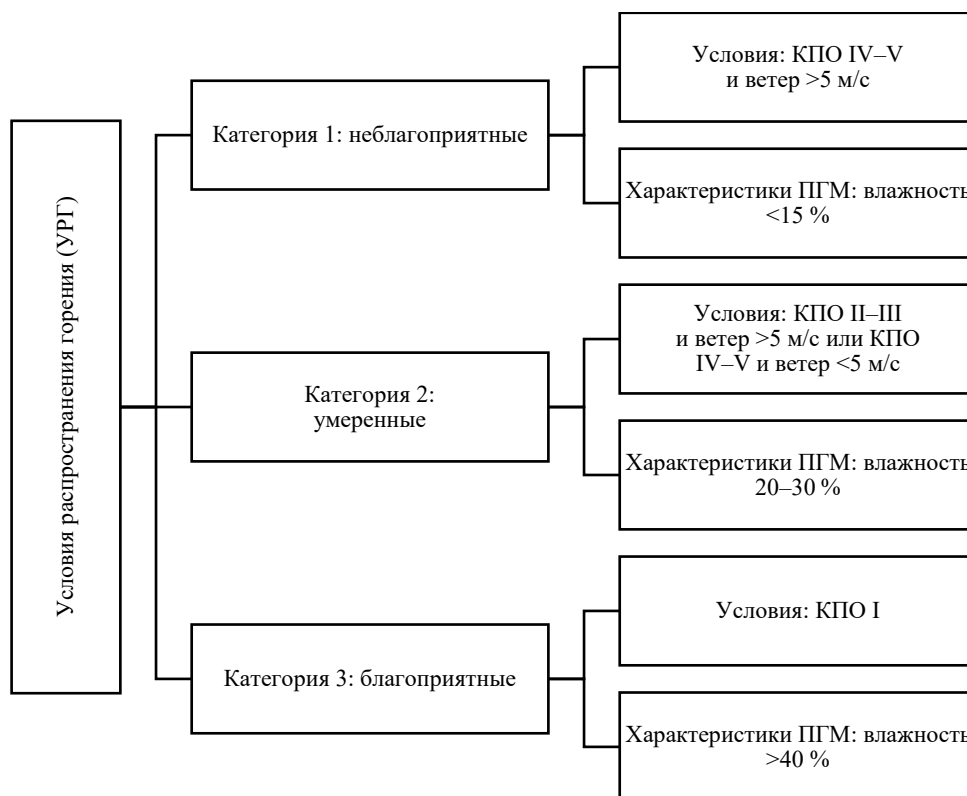


Рис. 4. Условия распространения горения

Условия распространения горения определяются как благоприятные, неблагоприятные и умеренные, а уровень угроз – низкий, средний и высокий.

Сценарная матрица пожарного риска. Для количественной оценки каждого сценария пожарной опасности ВЛЭП необходима шкала уровней риска. Анализ методов оценки рисков стал базой для предлагаемой четырех-уровневой классификации.

Низкий риск (R1). Вероятность воспламенения минимальна или отсутствуют условия для развития пожара. Характерно для комбинаций: слабые источники зажигания + ГС с высоким влагосодержанием + неблагоприятные УРГ (КПО I–II, отсутствие ветра).

Средний риск (R2). Умеренная вероятность воспламенения и ограниченный потенциал распространения огня. Характерен для горючих материалов с умеренной пирологической готовностью (класс Б), переходных погодных условий, соответствующих КПО III, при скорости ветра до 5 м/с.

Высокий риск (R3). Высокая вероятность воспламенения и значительный потенциал распространения пожара. Формируется при КПО IV–V и (или) скорости ветра более 5 м/с в сочетании с горючими материалами высокой или умеренной пирологической готовности (классы А, Б) и источниками зажигания повышенной энергетической мощности.

Критический риск (R4). Максимальная вероятность воспламенения и быстрое развитие пожара. Риск генерируют мощные источники зажигания (МФЗ, дуги ОЗЗ) в сочетании с сухими мелкодисперсными материалами при экстремальных погодных условиях (КПО V, ветер >5 м/с).

Уровень риска R для каждого сценария можно представить как функцию f . Она определяет качественное соответствие входных параметров и категорий риска $R1–R4$ на основе экспертной оценки двух параметров:

$$R = f(P_{вз}, T_{п}), \quad (2)$$

Здесь $P_{вз}$ — вероятность загорания, определяемая комбинацией типа ИЗ и класса ГС. $T_{п}$ — тяжесть последствий. Определяется классом ГС и категорией УРГ. Учитываются скорость и масштаб распространения.

В настоящей работе уровни риска качественно определены по характеристикам, установленным в предыдущих разделах. Количественная параметризация функции (2) и установление численных порогов для уровней риска $R1–R4$ является предметом дальнейших исследований.

Проведенный выше анализ трех ключевых компонентов (ИЗ, ГС и УРГ) позволяет сформировать итоговую сценарную матрицу (таблица 1).

Таблица 1

Матрица пожарного риска

ИЗ	Класс материалов	Условия распространения горения		
		Благоприятные	Умеренные	Неблагоприятные
ОЗЗ	А. Высокочувствительные	R2 — средний	R3 — высокий	R4 — критический
	Б. Среднечувствительные	R1 — низкий	R2 — средний	R3 — высокий
	В. Слабочувствительные	R1 — низкий	R1 — низкий	R2 — средний
	Г. Специфичные	R2 — средний	R2 — средний	R3 — высокий
МФЗ	А. Высокочувствительные	R3 — высокий	R4 — критический	R4 — критический
	Б. Среднечувствительные	R2 — средний	R3 — высокий	R4 — критический
	В. Слабочувствительные	R1 — низкий	R2 — средний	R3 — высокий
	Г. Специфичные	R2 — средний	R3 — высокий	R4 — критический

Обсуждение. Матрица объединила все 24 типовых сценария пожарной опасности (две группы источников зажигания × четыре класса горючих материалов × три категории условий распространения горения). Ниже приводятся принципы присвоения уровней риска в сценарной матрице.

Класс Г горючих материалов во всех сценариях характеризуется минимально допустимым уровнем риска R2, даже при благоприятных условиях распространения горения. Присвоение уровня R1 в данном случае нецелесообразно по следующим основаниям:

- специфические свойства таких материалов, включая способность к тлению и пониженную влажность конструкционной и пропитанной антипиренами древесины;
- наличие горючего мусора, склонного к устойчивому горению.

МФЗ, обладающие более высокой энергией теплового воздействия, как правило, повышают уровень риска на одну категорию по сравнению с ОЗЗ при одинаковом классе горючих материалов.

Неблагоприятные условия распространения горения (КПО IV–V при скорости ветра более 5 м/с) в сочетании с горючими материалами класса А во всех случаях формируют критический уровень риска R4 независимо от типа источника зажигания.

Около 21 % от общего числа сценариев — критические (R4). Они формируются преимущественно комбинациями:

- высокоэнергетических аварийных режимов (межфазные замыкания и отдельные сценарии однофазных);
- высокочувствительных и среднечувствительных горючих материалов;
- неблагоприятных метеоусловий.

Как видим, матрица представляет собой решение, которое обеспечивает переход от качественного описания обстановки на ВЛЭП к последующей количественной оценке вероятности пожара и его последствий.

Перечислим варианты практического применения данной матрицы:

- моделирование возникновения и распространения пожаров на ВЛЭП;
- доработка мер безопасности для конкретных участков сети;
- совершенствование оценки пожарного риска в электрических сетях.

Матрица позволяет не только фиксировать наличие повышенной опасности, но и ранжировать сценарии по значимости, что открывает возможность более рационального распределения ресурсов на защитные мероприятия.

Заключение. Выделены главные физические и пространственные факторы, определяющие пожарную опасность воздушных линий электропередачи. На их основе разработаны классификации источников зажигания, горючей среды и условий распространения горения, отражающие особенности линейной инфраструктуры и прилегающей территории.

Ключевой результат данного исследования — создание матрицы риска из 24 сценариев возникновения и развития пожара на ВЛЭП. В отличие от традиционного подхода, ориентированного на анализ отдельных факторов, предложенное решение учитывает взаимодействие источников зажигания, горючей среды и условий распространения горения. Результаты научных изысканий позволяют перейти от фрагментарной оценки пожарной опасности к системному анализу конкретных сценариев. Благодаря такому подходу можно обосновать решения по модернизации и усилению защиты отдельных участков сети. Это позволяет ориентировать инвестиции на элементы инфраструктуры и типовые ситуации, от которых в большей степени зависят пожарные риски [10].

Отметим, что полученный результат требует доработки. Определенные ограничения связаны с экспертной оценкой относительной значимости сценариев, что сказывается на объективности присвоения уровней риска. Полноценной количественной параметризации сценариев препятствует недостаточность статистики об авариях и экспериментальных данных по энергетическим характеристикам источников зажигания. Преодоление этого ограничения — приоритетное направление дальнейших исследований, включающее сбор и анализ статистики инцидентов.

Кроме того, в перспективе предстоит проработать функцию f , которая представляет уровень риска R для каждого сценария. Планируется, в частности, количественная параметризация функции и установление численных порогов для четырех уровней риска, рассмотренных в данной статье.

Отдельное направление развития систем обеспечения пожарной безопасности ВЛЭП — оперативное обнаружение возгораний. В этом контексте перспективно сочетание сценарного подхода к оценке риска с нейросетевыми технологиями компьютерного зрения, предназначенными для детектирования дыма и пламени в режиме реального времени [19].

Список литературы / References

1. Jahn W, Urban JL, Rein G. Powerlines and Wildfires: Overview, Perspectives, and Climate Change: Could There Be More Electricity Blackouts in the Future? *IEEE Power & Energy Magazine*. 2022;20(1):16–27. <https://doi.org/10.1109/MPE.2021.3122755>
2. Can Huang, Qinran Hu, Linwei Sang, Lucas DD, Wong R, Bin Wang, et al. Overview of the Emergency Shutdown Regime for Fire Prevention (PSPS): Policy, Practice, Models and Data Sources. *IEEE Transactions on Energy Markets, Policy and Regulation*. 2023;1(3):187–197. <https://doi.org/10.1109/TEMPR.2023.3287027>
3. Bill Chiu, Rajdeep Roy, Thuan Tran. Wildfire Resiliency: California Case for Change. *IEEE Power & Energy Magazine*. 2022;20(1):28–37. <https://doi.org/10.1109/MPE.2021.3122730>
4. Сибиркин Р.А., Сибиркина А.Р., Лихачев С.Ф. Основные причины возникновения лесных пожаров на территории Челябинской области. *Лесной вестник*. 2020;24(3):39–44. <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-3-39-44>
Sibirkin RA, Sibirkina AR, Likhachev SF. Main Reasons for Forest Fires in Chelyabinsk Region. *Forestry Bulletin*. 2020;24(3):39–44. (In Russ.) <https://doi.org/10.18698/2542-1468-2020-3-39-44>
5. Зыков В.И., Козлова Ю.С., Крупин М.В. Определение уровня пожарной опасности воздушных линий электропередачи напряжением до 1000 В. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. 2021;1:34–39. <https://doi.org/10.25257/FE.2021.1.34-39>
Zykov VI, Kozlova YuS, Krupin MV. Fire Hazard Level Determination for Overhead Power Lines with a Voltage of up to 1000V. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2021;1:34–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.25257/FE.2021.1.34-39>
6. Федотов А.И., Вагапов Г.В., Абдуллазянов Р.Э., Федотов Е.А. Метод расчета места однофазного замыкания на землю на фидере древовидной структуры по ограниченной информации о распределении напряжений нулевой последовательности. *Вестник Мурманского государственного технического университета*. 2023;26(4):457–471. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-457-471>
Fedotov AI, Vagapov GV, Abdullazyanov RE, Fedotov EA. The Single Phase-to-Ground Fault Location Calculation Method Based on Limited Information on the Distribution of Zero-Sequence Voltages on the Tree-Structured Feeder. *Vestnik of MSTU*. 2023;26(4):457–471. (In Russ.) <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-4-457-471>
7. Xinyue Wang, Bocchini P. Predicting Wildfire Ignition Induced by Dynamic Conductor Swaying under Strong Winds. *Scientific Reports*. 2023;13:3998. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30802-w>
8. Reza Bayani, Waseem M, Manshadi SD, Davani H. Quantifying the Risk of Wildfire Ignition by Power Lines Under Extreme Weather Conditions. *IEEE Systems Journal*. 2023;17(1):1024–1034. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2022.3188300>
9. Taowei Chen, Ling Zhu, Qiao Xia, Honglei Deng and Chen Zhou. Disaster Risk Assessment of Transmission Lines Based on TOPSIS. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;533:012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/533/1/012001>
10. Taylor S, Roal LA. A Framework for Risk Assessment and Optimal Line Upgrade Selection to Mitigate Wildfire Risk. *Electric Power Systems Research*. 2022;213:108592. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108592>
11. Farnes A, Weber K, Koerner C, Araújo K, Forsgren C. The Power Grid/Wildfire Nexus: Using GIS and Satellite Remote Sensing to Identify Vulnerabilities. *Fire*. 2023;6(5):187. <https://doi.org/10.3390/fire6050187>
12. Weijie Chen, You Zhou, Enze Zhou, Zhun Xiang, Wentao Zhou, Junhan Lu. Wildfire Risk Assessment of Transmission-Line Corridors Based on Naïve Bayes Network and Remote Sensing Data. *Sensors*. 2021;21(2):634. <https://doi.org/10.3390/s21020634>

13. Козлова Ю.С. Оценка пожарной опасности короткого замыкания для задач расследования и экспертизы пожаров от аварийных режимов в воздушных линиях электропередачи. *XXI век. Техносферная безопасность*. 2021;6(4):363–368. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-363-368>

Kozlova YuS. Short Circuit Fire Risk Assessment in Investigating and Examining Fires Caused by Emergency Modes in Overhead Transmission Lines. *XXI Century. Technosphere Safety*. 2021;6(4):363–368. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2021-4-363-368>

14. Jiajun Liu, Chenjing Li, Yue Liu, Ji Sun, Haokun Lin. Single Line-to-Ground Fault Type Multilevel Classification in Distribution Network Using Realistic Recorded Waveform. *Sensors*. 2023;23(21):8948. <https://doi.org/10.3390/s23218948>

15. Гоман П.Н. Воспламеняемость лесного горючего материала при воздействии теплового потока. *Тр. Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства*. 2023;3:112–123. <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2023.3.112>

Goman PN. Flammability of Forest Combustible Material When Exposed to the Heat Flow. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*. 2023;3:112–123. (In Russ.) <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2023.3.112>

16. Ramadan ML, Carrascal J, Osorio A, Hidalgo JP. The Effect of Moisture Content and Thermal Behaviour on the Ignition of Eucalyptus Saligna Leaves. *International Journal of Wildland Fire*. 2021;30(9):680–690. <https://doi.org/10.1071/WF20069>

17. Bo Zhou, Xinwei Sun, Yunyang Xu, Wei Wei. Research on the Quantitative Assessment Method of HVDC Transmission Line Failure Risk during Wildfire Disaster. *Electronics*. 2024;13(11):2119. <https://doi.org/10.3390/electronics13112119>

18. Rongquan Fan, Wenhui Zeng, Ziqiang Ming, Wentao Zhang, Ruirui Huang, Junyong Liu. Risk Reliability Assessment of Transmission Lines under Multiple Natural Disasters in Modern Power Systems. *Energies*. 2023;16(18):6548. <https://doi.org/10.3390/en16186548>

19. Xiaolong Huang, Weicheng Xie, Qiwen Zhang, Yesen Lan, Huiling Heng, Jiawei Xiong. A Lightweight Wildfire Detection Method for Transmission Line Perimeters. *Electronics*. 2024;13(16):3170. <https://www.mdpi.com/2079-9292/13/16/3170>

Об авторе:

Денис Александрович Огурцов, аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета (НИУ) (454080, Российская Федерация, г. Челябинск, ул. Ленина, 86), [SPIN-код](https://orcid.org/0009-0001-9010-1010), [ORCID](mailto:ogurtsovda@susu.ru), ogurtsovda@susu.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Denis A. Ogurtsov, Postgraduate Student of the Department of Life Safety, South Ural State University (86, Lenin St., Chelyabinsk, 454080, Russian Federation), [SPIN-code](https://orcid.org/0009-0001-9010-1010), [ORCID](https://orcid.org/0009-0001-9010-1010), ogurtsovda@susu.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 23.12.2025

Принята к публикации / Accepted 15.01.2026

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY









УДК 614.841.4:622.276

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-19-31>

Комплексное управление пожарными и профессиональными рисками на предприятиях

Л.Ю. Фомичев¹  , И.А. Минаева¹ , С.П. Сухарский² ,
С.В. Батманов² , Я.М. Кузнецов² 

¹ Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина, г. Москва, Российская Федерация

² Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация

✉ fomichev.lu@yandex.ru



EDN: BPHDVL

Аннотация

Введение. Обеспечение пожарной безопасности на предприятиях нефтегазовой отрасли является одной из самых важных задач в системе управления охраной труда, поскольку такие объекты характеризуются высокой концентрацией пожароопасных и взрывоопасных веществ. Согласно статистическим данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), около 38 % аварий на объектах нефтегазового комплекса связано с пожарами и взрывами. Вступление в силу новой методики определения расчетных величин пожарного риска, а также требований к системе управления охраной труда обуславливает необходимость формирования интегрированного подхода к управлению пожарными рисками. Научная проблема состоит в отсутствии комплексной методологии, которая бы увязывала процедуры оценки пожарного риска с процессами управления профессиональными рисками в рамках единой системы. Целью данного исследования является разработка интегрированной системы управления пожарными рисками, ориентированной на повышение эффективности обеспечения безопасности труда на предприятиях нефтегазовой отрасли.

Материалы и методы. Методология исследования основана на системном подходе к интеграции процедур оценки пожарного риска согласно приказу МЧС России № 533 с процессами управления охраной труда (СУОТ). Базу исследования составили данные с 12 объектов нефтегазовой отрасли: четыре установки подготовки газа, три компрессорные станции, три нефтеперекачивающие станции и две газораспределительные станции. Основным объектом — установка подготовки газа в Ямало-Ненецком автономном округе (ЯНАО). Исходными данными служили материалы по авариям за период не менее трех лет. Для определения поправочных коэффициентов СУОТ привлечена группа экспертов: специалисты по пожарной безопасности, инженеры по охране труда и технологи. Экспертная оценка проводилась методом Дельфи с анализом согласованности по коэффициенту конкордации Кендалла ($W = 0,82$). В рамках исследования разрабатывались математическая модель с поправочными коэффициентами и интегрированная матрица опасностей. На первом этапе были проведены идентификация и классификация опасностей согласно ст. 9 Федерального закона № 123-ФЗ от 22.07.2008 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности». На втором этапе построены логические деревья событий, расчет интегрированных показателей с использованием JupyterNotebook (Python, библиотеки Pandas, Scipy, NumPy) и сопоставление с традиционными методиками.

Результаты исследования. Разработана интегрированная система управления пожарными рисками, включающая в себя пять взаимосвязанных процессов: идентификация опасностей, оценка риска, разработка мер управления, мониторинг и постоянное улучшение. Предложена математическая модель расчета потенциального пожарного риска с введением коэффициента интеграции СУОТ, который позволяет учесть влияние организационных и технических мер охраны труда на вероятность и последствия пожаров. В рамках интегрированного подхода выявлено 47 видов опасностей против 35 при использовании традиционной методики, что свидетельствует о более детализированной идентификации источников риска. Установлено снижение пожарного риска на 22–26 % при применении интегрированной системы, по сравнению с базовым уровнем.

Обсуждение. Применение интегрированного подхода обеспечивает повышение эффективности управления профессиональными рисками на 25–30 % за счет выраженного синергетического эффекта, подтвержденного сравнительным анализом традиционных и предлагаемых методов оценки рисков на нефтегазовых объектах. Указанный эффект формируется благодаря комплексному учету мероприятий СУОТ, влияющих на частоту возникновения и тяжесть последствий пожароопасных сценариев, с одновременным учетом ограничений применения методики, таких как зависимость от полноты и репрезентативности данных по авариям (не менее трех лет наблюдений) и ориентация преимущественно на объекты с непрерывными технологическими процессами. Полученные результаты согласуются с международными исследованиями по интеграции систем безопасности, где аналогичные подходы демонстрируют повышение точности идентификации опасностей на 20–35 % и улучшение качества последующей оценки рисков.

Заключение. Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования систем управления безопасностью на предприятиях нефтегазовой отрасли, включая внедрение разработанной математической модели с коэффициентами СУОТ для снижения пожарных рисков на 22–26 %. Предложенная интегрированная система вносит вклад в развитие научных основ управления рисками в промышленности, открывая перспективы дальнейших исследований по адаптации данного подхода к морским объектам, а также к условиям вечной мерзлоты и других экстремальных природно-климатических зон. Рекомендуется применение модели для оптимизации распределения ресурсов в СУОТ с учетом результатов экспертной валидации и регулярного пересмотра параметров по мере накопления статистических данных.







Ключевые слова: пожарная безопасность, нефтегазовая отрасль, система управления охраной труда, профессиональные риски, пожарный риск, идентификация опасностей, математическое моделирование, интегрированная система управления, производственная безопасность, СУОТ

Благодарности. Авторы выражают благодарность заведующей кафедрой промышленной безопасности и охраны окружающей среды Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) им. И.М. Губкина, доктору технических наук, профессору Елене Витальевне Глебовой за помощь в получении данных, позволивших провести исследование.

Для цитирования. Фомичев Л.Ю., Минаева И.А., Сухарский С.П., Батманов С.В., Кузнецов Я.М. Комплексное управление пожарными и профессиональными рисками на предприятиях. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2026;10(1):19–31. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-19-31>

Original Empirical Research

Integrated Management of Fire and Occupational Risks at Enterprises

Leonid Yu. Fomichev¹  , Irina A. Minaeva¹ , Stanislav P. Sukharsky² ,
Sergei V. Batmanov² , Yaroslav M. Kuznetsov² 

¹ Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

✉ fomichev.lu@yandex.ru

Abstract

Introduction. Ensuring fire safety at oil and gas enterprises is a crucial aspect of occupational health and safety management system. These facilities are known to have a high concentration of flammable and explosive materials. According to statistics from the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision (Rostekhnadzor), approximately 38% of accidents at oil and gas facilities are related to fires and explosions. The introduction of a new method for calculating fire risk values and requirements for the occupational safety and health management system necessitates an integrated approach to fire risk management. The scientific problem is the lack of a comprehensive methodology linking fire risk assessment procedures with occupational risk management processes within a single system. The purpose of this research is to create an integrated fire risk management system that aims to enhance the effectiveness of occupational safety in oil and gas industry.

Materials and Methods. The research methodology was based on a systematic approach to integrating fire risk assessment procedures in accordance with Order No. 533 of the Ministry of Emergency Situations of Russia and Occupational Health and Safety Management System (OHSMS) processes. The research base consisted of data from 12 oil and gas industry facilities: four gas treatment units, three compressor stations, three oil pumping stations, and two gas distribution stations. The main facility was a gas treatment unit located in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug (YNAO). Initial data were collected over a period of at least three years, and a group of experts, including fire safety specialists, occupational safety engineers, and process specialists, was involved in determining the OHSMS

correction factors. Expert evaluation was conducted using the Delphi method, with consistency analysis using the Kendall's coefficient of concordance ($W = 0.82$). As part of the research, a mathematical model with correction factors and an integrated hazard matrix was developed. At the first stage, identification and classification of hazards were carried out in accordance with Article 9 of Federal Law No. 123-FZ “Technical Regulations on Fire Safety Requirements”, dated July 22, 2008. At the second stage, logical event trees were built and integrated metrics were calculated using Jupyter Notebook (Python, Pandas, Scipy, NumPy libraries), and compared with traditional methods.

Results. An integrated fire risk management system was developed, which included five interrelated processes: hazard identification, risk assessment, development of management measures, monitoring and continuous improvement. A mathematical model for calculating potential fire risk was proposed, introducing the OHSMS integration coefficient, which allows for the consideration of the impact of organizational and technical occupational safety measures on fire likelihood and consequences. Within the integrated approach, 47 types of hazards were identified compared to 35 using the traditional methods, indicating more detailed risk source identification. The fire risk was reduced by 22–26% when using the integrated system compared to the baseline level.

Discussion. The use of an integrated approach to occupational risk management can increase its efficiency by 25–30%, due to a synergistic effect that has been confirmed by a comparative analysis of traditional and proposed risk assessment methods at oil and gas facilities. This effect is achieved through the integrated consideration of OHSMS measures, which affect the frequency and severity of fire-related incidents, while taking into account the limitations of the methodology, such as dependence on the completeness and representativeness of accident data (at least three years of observations) and focusing mainly on objects with continuous technological processes. The results obtained are consistent with international research on safety system integration, which has shown that similar approaches can improve hazard identification accuracy by 20–35% and enhance the quality of risk assessments.

Conclusion. The results of this study can be used to improve safety management systems at oil and gas enterprises. This includes the introduction of a mathematical model with OHSMS coefficients to reduce fire risks by 22–26%. The proposed integrated system contributes to the development of scientific foundations for risk management in industry. It opens up prospects for further research on adapting this approach to marine facilities, as well as permafrost and other extreme climates. It is recommended to use the model to optimize resource allocation in OHSMS. This should take into account the results of expert evaluations and regular revisions of parameters as more statistical data becomes available.

Keywords: fire safety, oil and gas industry, occupational health and safety management system, occupational risks, fire risk, hazard identification, mathematical modeling, integrated management system, industrial safety, OHSMS

Acknowledgements. The authors would like to thank Elena V. Glebova, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Industrial Safety and Environmental Protection at the Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), for her assistance in obtaining data that made this research possible.

For Citation. Fomichev LYu, Minaeva IA, Sukharsky SP, Batmanov SV, Kuznetsov YaM. Integrated Management of Fire and Occupational Risks at Enterprises. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(1):19–31. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-19-31>

Введение. Обеспечение пожарной безопасности на предприятиях нефтегазовой отрасли представляет собой важную задачу, особенно в контексте современных мировых трендов в области безопасности и охраны труда. Во многих странах все жестче становятся нормы и стандарты, касающиеся охраны окружающей среды и безопасности работников, что ставит перед нефтегазовой отраслью дополнительные вызовы. Отсутствие надлежащих мер по обеспечению пожарной безопасности может привести не только к катастрофическим последствиям для здоровья работников, но и к значительным финансовым потерям, включая компенсации пострадавшим, затраты на восстановление объектов и штрафы за нарушение законодательства. Игнорирование вопросов пожарной безопасности может вызвать разрушительные экологические последствия с массовыми утечками опасных веществ. Это, в свою очередь, может привести к негативному восприятию отрасли в целом. Таким образом, актуальность разработки и внедрения эффективных систем управления пожарными рисками в нефтегазовой отрасли становится неоспоримой, и острая необходимость в комплексном подходе к решению данной проблемы в условиях глобальных изменений требует незамедлительных действий. Анализ статистических данных по объектам нефтегазовой отрасли за период 2019–2023 годов показывает, что несмотря на проводимые мероприятия по обеспечению безопасности по-прежнему отмечаются значительные потери от пожаров и взрывов. Вступление в силу новой методики определения расчетных величин пожарного риска, а также требований к системе управления охраной труда обуславливает необходимость формирования интегрированного подхода к управлению пожарными рисками. Но на сегодняшний день комплексная методология, которая бы увязывала процедуры оценки пожарного риска с процессами управления профессиональными рисками в рамках единой системы, не выработана.

Согласно статистическим данным Ростехнадзора, в период с 2019 по 2023 год в среднем 38 % аварий на объектах нефтегазовой отрасли были связаны с пожарами и взрывами, что подчеркивает актуальность разработки эффективных систем управления пожарными рисками. На рис. 1 представлены данные об авариях на предприятиях нефтегазодобывающей промышленности за 2019–2023 годы. На рис. 2 показано количество несчастных случаев на объектах нефтегазодобывающей промышленности за этот же период.

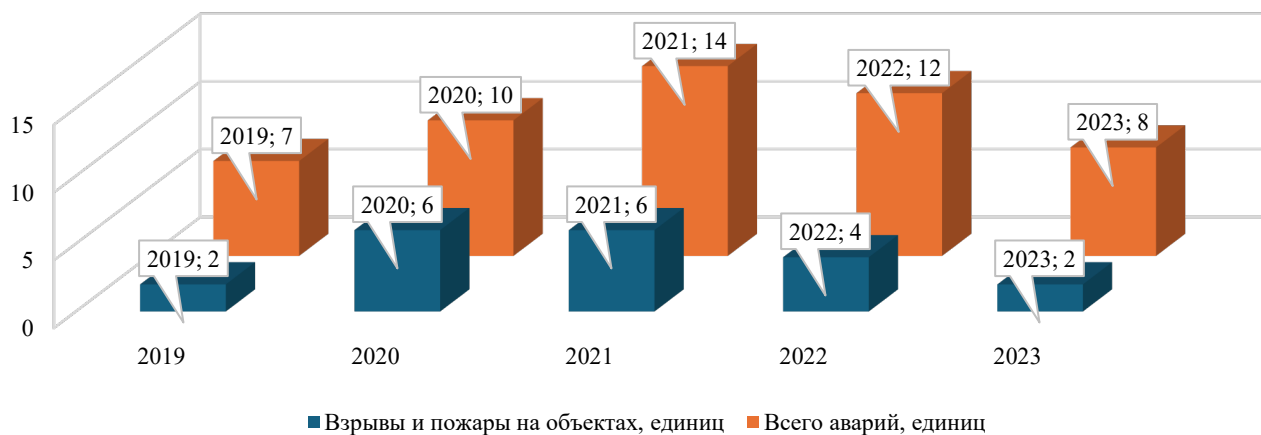


Рис. 1. Количество аварий на объектах нефтегазодобывающей промышленности в 2019–2023 годах

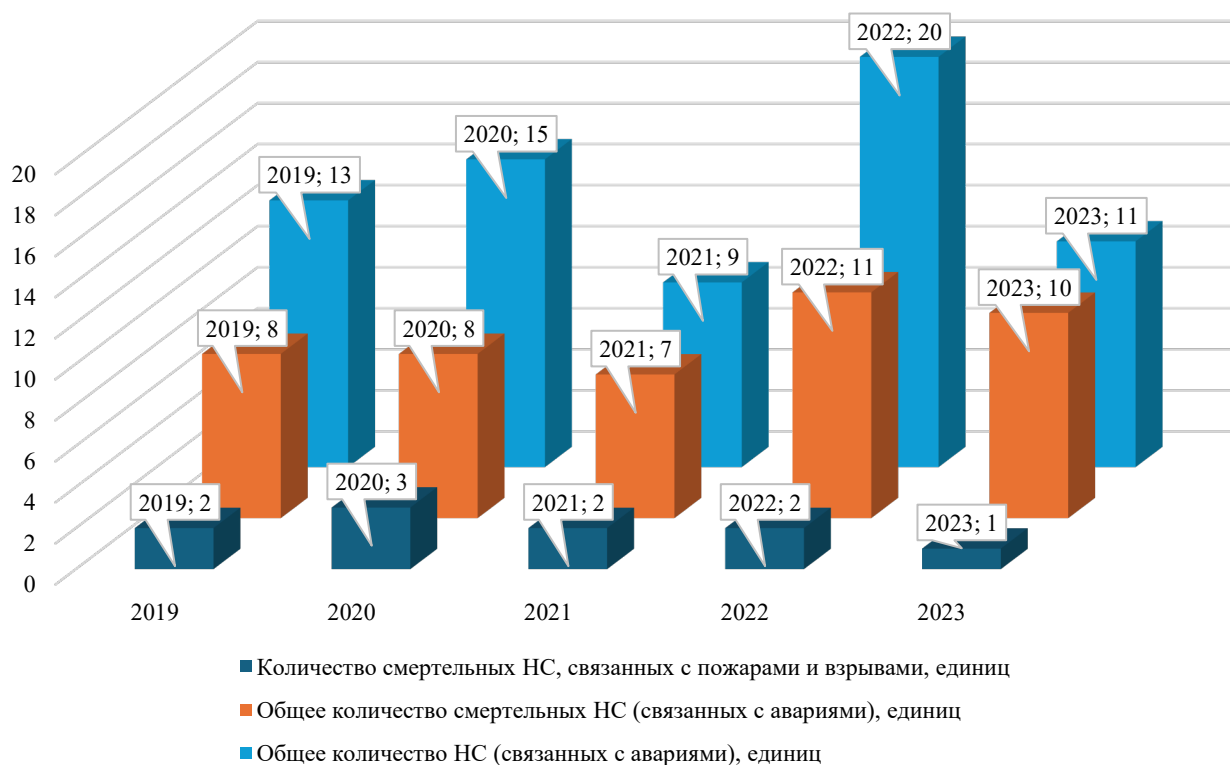


Рис. 2. Количество несчастных случаев на объектах нефтегазодобывающей промышленности в 2019–2023 годах

На графиках представлены динамика аварийности и связанные с ней последствия на объектах нефтегазовой промышленности за 2019–2023 годы. В течение этого периода доля аварий среди всех происшествий изменялась в диапазоне от 25 до 60 % при среднем значении 38 %. Минимальное количество аварий зафиксировано в 2023 году, что свидетельствует об эффективности проводимых мероприятий по управлению промышленной и пожарной безопасностью. Аналогичным образом доля несчастных случаев снизилась с 25 в 2019 году до 10 % в 2023 году, а среднее значение за пятилетний период составило 23 %. Средняя доля несчастных случаев, связанных с пожарами и взрывами, сохранялась на уровне около 24 %, демонстрируя устойчивую тенденцию к снижению.

Смертельные несчастные случаи, связанные с пожарами, на рассматриваемых объектах оставались на сравнительно низком уровне, что подтверждает результативность интеграции систем управления промышленной и пожарной безопасностью, а также реализуемых профилактических мероприятий [1]. Выявленные тенденции подчеркивают необходимость дальнейшего совершенствования подходов к обеспечению комплексной безопасности на предприятиях нефтегазовой отрасли и актуальность продолжения работы по снижению уровней риска, частоты тяжелых и групповых инцидентов и масштабов их последствий [2].

Вступившая в силу с 1 января 2025 года новая методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (приказ МЧС России от 26.06.2024 № 533)¹ и действующее Примерное положение о системе управления охраной труда (приказ Минтруда России от 29.10.2021 № 776н)² требуют разработки интегрированного подхода к управлению пожарными рисками в рамках общей системы управления охраной труда. В новой методике МЧС России сохранен исчерпывающий перечень опасных факторов пожара, определенный статьей 9 Федерального закона № 123-ФЗ, а также уточнены критерии поражения людей и подходы к моделированию сценариев развития пожара и оценке соответствующих рисков. Основные изменения касаются детализации расчетных процедур, требований к анализу исходных событий и обоснованию исходных данных, а не расширения перечня опасных факторов. Одновременно требования системы управления охраной труда предусматривают регулярное выявление опасностей и оценку профессиональных рисков, что формирует методологическую основу для интеграции процедур оценки пожарного риска в общую систему управления охраной труда [3].

Анализ современных научных исследований показывает, что в большинстве работ вопросы пожарной безопасности и охраны труда рассматриваются отдельно, без достаточной проработки их взаимосвязи [4]. Вместе с тем специфика нефтегазовой отрасли предполагает использование комплексного подхода [5], ориентированного на учет взаимовлияния различных видов профессиональных и пожарных рисков, а также их совокупного влияния на безопасность производственной деятельности [6].

Целью данного исследования является разработка интегрированной системы управления пожарными рисками, основанной на требованиях актуальной методики МЧС России и принципах системы управления охраной труда, для повышения эффективности обеспечения безопасности труда на предприятиях нефтегазовой отрасли и снижения вероятности возникновения опасных событий.

Материалы и методы. Методология исследования основана на системном подходе к интеграции процедур оценки пожарного риска согласно приказу МЧС России № 533 с процессами управления профессиональными рисками в рамках СУОТ согласно приказу Минтруда России № 776н. Исследование включает в себя разработку интегрированной матрицы опасностей, которая связывает первичные и сопутствующие пожарные опасности (согласно Федеральному закону № 123-ФЗ) с профессиональными рисками для различных категорий персонала. Для валидации методологии были привлечены эксперты в области пожарной безопасности и охраны труда, применены методы экспертной оценки и статистического анализа.

Исследование проведено на основе данных по 12 объектам нефтегазовой отрасли, расположенным в Ямало-Ненецком автономном округе и входящим в состав одной крупной акционерной нефтегазодобывающей компании. Для обеспечения репрезентативности выборки критериями включения в нее объектов являлись наличие установленной и функционирующей системы управления охраной труда, сертифицированной в соответствии с ГОСТ Р ИСО 45001, наличие задокументированной информации о производственных инцидентах за период не менее пяти лет, наличие данных о проведенных проверках органами надзора в области промышленной безопасности и охраны труда, разнообразии технологических процессов и типов оборудования. Выборка включала в себя четыре установки подготовки газа с производительностью от 15 до 45 млн м³/сутки и рабочим давлением до 25 Мпа, три компрессорные станции ступенькового сжатия производительностью 40–80 млн м³/сутки общей мощностью 12–32 МВт и давлением нагнетания до 10 Мпа, три нефтеперекачивающие станции (нефтепровод) производительностью 8–25 млн тонн в год и давлением подачи до 6 Мпа, две газораспределительные станции (ГРС) с давлением редуцирования от 2,5 до 1,2 МПа и производительностью до 3,5 млн м³/сутки. Для каждого объекта были собраны и проанализированы следующие данные: акты и протоколы проверок органов надзора в области промышленной безопасности и охраны труда за 2018–2023 годы, реестры производственных инцидентов, включая случаи нарушения целостности трубопроводов, утечек углеводородов, отказов оборудования и травм персонала, результаты анализа опасностей, проведенного компанией (HAZOP, анализ видов и последствий отказов), параметры оборудования, извлеченные из технической документации и паспортов установок, данные о сценариях развития пожаров, рассчитанные с использованием моделей в программных ком-

¹ Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. Приказ Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий № 533 от 26.06.2024. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202409030008> (дата обращения: 18.12.2025).

² Об утверждении Примерного положения о системе управления охраной труда. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=409457> (дата обращения: 28.10.2025)

плексах (PHAST, ALOHA или эквивалентных), информация о выполненных мероприятиях по охране труда и пожарной безопасности, отчеты о происшествиях и листки нетрудоспособности, связанные с профессиональными рисками. База данных о нарушениях требований пожарной и промышленной безопасности была составлена на основе открытых реестров органов надзора и внутренних реестров компании.

Предлагаемая интегрированная система включает в себя следующие взаимосвязанные процессы. Первый процесс — идентификация пожарных опасностей в рамках общего процесса выявления профессиональных рисков согласно СУОТ. Второй — оценка пожарного риска с использованием методики МЧС России № 533. Третий — разработка мер управления интегрированными рисками. Четвертый — мониторинг и контроль эффективности принятых мер. Пятый — постоянное улучшение системы управления рисками [7].

Математическая модель интегрированной оценки рисков содержит расчет потенциального пожарного риска в рамках интегрированной системы и определяется по формуле:

$$P_{\text{инт.}}(a) = K_{\text{СУОТ}} \cdot \sum_{j=1}^J Q_j \cdot Q_{\text{оij}}(a), \quad (1)$$

где $K_{\text{СУОТ}}$ — коэффициент интеграции с СУОТ, учитывающий эффективность системы управления охраной труда; J — число сценариев возникновения пожара; Q_j — частота реализации j -го сценария пожара, год⁻¹; $Q_{\text{оij}}(a)$ — условная вероятность поражения человека при реализации j -го сценария.

Коэффициент интеграции с СУОТ определяется по формуле:

$$K_{\text{СУОТ}} = K_{\text{иден.}} \cdot K_{\text{обуч.}} \cdot K_{\text{конт.}} \cdot K_{\text{улуч.}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{иден.}}$ — коэффициент эффективности идентификации опасностей (0,8–1,2); $K_{\text{обуч.}}$ — коэффициент эффективности обучения персонала (0,7–1,1); $K_{\text{конт.}}$ — коэффициент эффективности контроля (0,8–1,3); $K_{\text{улуч.}}$ — коэффициент постоянного улучшения (0,9–1,1).

Для определения значений коэффициентов и валидации модели была привлечена группа из 15 экспертов: пять специалистов по пожарной безопасности со стажем работы от 8 до 25 лет, пять инженеров по охране труда со стажем от 6 до 20 лет и пять технологов производства со стажем от 10 до 30 лет. Критериями отбора экспертов являлись наличие высшего профильного образования, опыт работы на объектах нефтегазовой отрасли не менее пяти лет, наличие сертификатов в области промышленной безопасности, а также отсутствие конфликта интересов с исследуемыми объектами. Экспертная оценка коэффициентов $K_{\text{иден.}}$, $K_{\text{обуч.}}$, $K_{\text{конт.}}$, $K_{\text{улуч.}}$ проводилась методом Дельфи в три раунда в формате анонимного анкетирования: в первом раунде эксперты давали индивидуальные оценки (в пределах заранее заданных допустимых значений), во втором раунде им предоставлялась агрегированная сводка по группе (медиана и межквартильный размах по каждому коэффициенту) с предложением уточнить ответы, в третьем раунде выполнялось подтверждение согласованных значений. Достижение согласованности контролировалось по коэффициенту конкордации Кендалла ($W = 0,82$). Итоговые значения коэффициентов определялись как медианы экспертных оценок, а интервальные значения (диапазоны) задавались границами межквартильного размаха (25-й и 75-й перцентили) с последующим округлением до удобных для практического применения значений.

Значения коэффициентов в формуле (2) определены на основе экспертной оценки с использованием метода Дельфи и статистического анализа согласованности Кендалла. Диапазоны выбраны с учетом данных аналогичных исследований [6–10]: $K_{\text{иден.}}$ отражает вариабельность выявления опасностей в зависимости от полноты баз данных, $K_{\text{обуч.}}$ — влияние уровня подготовки персонала на снижение частоты инцидентов, $K_{\text{конт.}}$ — эффективность мониторинга оборудования по историческим данным аварий, $K_{\text{улуч.}}$ — вклад итеративных улучшений СУОТ в долгосрочное снижение рисков.

В качестве методов статистической обработки использовались коэффициент конкордации Кендалла для оценки согласованности экспертов ($W = 0,82$), дисперсионный анализ ANOVA для определения значимости различий между группами, а также корреляционный анализ Пирсона для выявления связей между параметрами. Расчеты производились в среде разработки JupyterNotebook на языке Python с применением библиотек Matplotlib, Pandas, Scipy, NumPy.

В таблице 1 представлена интегрированная матрица опасностей, разработанная на основе анализа требований приказа Минтруда России № 776н (система управления профессиональными рисками) и методики МЧС России № 533 (оценка пожарного риска) с учетом классификации пожаров по ст. 8 Федерального закона № 123-ФЗ (классы А–F) и исчерпывающего перечня опасных факторов пожара по ст. 9 (первичные факторы: пламя и искры, тепловой поток, повышенная температура, токсичные продукты, пониженная концентрация кислорода, снижение видимости; сопутствующие: осколки, радиоактивные/токсичные вещества, вынос высокого напряжения, факторы взрыва, воздействие огнетушащих веществ). Матрица обеспечивает комплексную идентификацию опасностей, связывая их с профессиональными рисками для нефтегазовых объектов, где преобладают классы В (горючие жидкости), С (газы) и Е (электроустановки под напряжением).

При построении матрицы для каждой опасности фиксировались соответствующий опасный фактор пожара (первичный/сопутствующий), связь с профессиональным риском, критерий присвоения уровня риска, задаваемый через диапазон вероятности реализации сценария (год⁻¹), и ожидаемая тяжесть последствий для персонала (например, ожоги/отравление/электротравма).

Матрица применялась для качественной ранжировки опасностей и выбора приоритетных мер управления, а также как вход для построения логических деревьев событий. При этом значения поправочных коэффициентов $K_{иден.}$, $K_{обуч.}$, $K_{конт.}$, $K_{улуч.}$ определялись отдельно по экспертной процедуре (метод Дельфи) и затем подставлялись в формулу (2).

Таблица 1

Интегрированная матрица опасностей на объектах нефтегазовой отрасли

Группа опасностей (по приказу 776н)	Опасность (пример для нефтегазовой отрасли)	Опасный фактор (ст. 9 123-ФЗ)	Тип фактора	Связь с профессиональным риском (приказ 776н)	Уровень риска	Критерий присвоения
Механические	Разгерметизация трубопроводов газа	Осколки от разрушения оборудования	Сопутствующий	Риск травмирования при обслуживании	Высокий	Вероятность > 0,01 год ⁻¹ + >50 чел. персонала
Термические	Возгорание паров углеводородов	Пламя и искры, тепловой поток	Первичный	Ожоги и тепловые травмы	Высокий	Вероятность > 0,001 год ⁻¹ + тяжелые ожоги
Химические	Выброс токсичных газов при пожаре	Повышенная концентрация токсичных продуктов	Первичный	Отравление/проф. заболевание	Средний	Вероятность — 0,0001–0,001 год ⁻¹ + зона токсичности
Взрывопожароопасные	Взрыв газовой-душной смеси	Опасные факторы взрыва	Сопутствующий	Ударная волна, травмы	Высокий	Вероятность > 0,001 год ⁻¹ + ударная волна
Электрические	Короткое замыкание в электроустановках	Поражение электрическим током, поражение электрической дугой	Сопутствующий	Поражение электрическим током	Средний	Вероятность — 0,0001–0,001 год ⁻¹ + электротравма
Токсикологические	Дым от горения изоляции	Снижение видимости, пониженная концентрация O ₂	Первичный	Удушье, дезориентация	Высокий	Вероятность > 0,01 год ⁻¹ + удушье/дезориентация
Физические	Повышенная температура в компрессорной	Повышенная температура	Первичный	Тепловой стресс	Средний	Вероятность — 0,0001–0,001 год ⁻¹ + тепловой стресс

Расширенная матрица учитывает классификационные признаки опасных факторов пожара по Федеральному закону № 123-ФЗ, обеспечивая полное покрытие первичных и сопутствующих проявлений. Интеграция с приказом № 776н позволяет систематически выявлять опасности в СУОТ, минимизируя профессиональные риски (травмы, заболевания) на объектах с высокой пожароопасностью. Валидация интегрированной матрицы опасностей выполнена экспертной группой в рамках экспертной процедуры (метод Дельфи): эксперты оценивали 1) полноту покрытия опасных факторов пожара по ст. 9 Федерального закона № 123-ФЗ (наличие первичных и сопутствующих факторов), 2) корректность отнесения опасностей к группам по приказу Минтруда России № 776н, 3) обоснованность связей «опасность — профессиональный риск» для категорий персонала, 4) однозначность формулировок строк матрицы и 5) обоснованность присвоения уровня риска по критериям, приведенным в соответствующем столбце «Критерий присвоения». По результатам анализа замечаний экспертов уточнены формулировки отдельных строк и критерии присвоения уровней риска, итоговая версия матрицы признана применимой для нефтегазовых объектов в рамках предложенного подхода.

Построение логических деревьев событий осуществлялось с учетом влияния мероприятий системы управления охраной труда на развитие пожароопасных ситуаций. Расчет интегрированных рисков выполнялся с применением поправочных коэффициентов, отражающих эффективность функционирования системы управления охраной труда.

Для учета влияния СУОТ на частоту реализации пожароопасных ситуаций использована модифицированная формула:

$$Q_{j, \text{мод}} = Q_{j, \text{баз}} \cdot \prod_{k=1}^n (1 - E_k \cdot P_k), \quad (3)$$

где $Q_{j, \text{баз}}$ — базовая частота реализации j -го сценария; E_k — эффективность k -го мероприятия СУОТ; P_k — вероятность срабатывания k -го мероприятия; n — количество применимых мероприятий СУОТ [11].

Для проведения количественной оценки потенциального пожарного риска на территории установки подготовки газа были выбраны пять контрольных точек (А–Е), характеризующих различные зоны потенциального воздействия опасных факторов пожара. Точка А соответствовала зоне компрессорного оборудования (высокое давление и высокая концентрация технологического оборудования), точка В — зоне установки осушки газа, точка С — зоне газоочистного оборудования, точка D — административно-бытовой зоне, точка Е — границе санитарно-защитной зоны объекта.

Сбор исходных данных для разработки интегрированной системы выполнен по 12 объектам нефтегазовой отрасли, включенным в выборку; при этом установка подготовки газа в ЯНАО использовалась как базовый объект для детализированной апробации и калибровки расчетных процедур. Объект включал в себя различное технологическое оборудование для полного цикла осушки и очистки природного газа. По результатам обработки данных с объектов зарегистрирована база данных о нарушениях требований пожарной и промышленной безопасности [12].

Результаты исследования. В рамках интегрированного подхода выявлено 47 видов опасностей, из которых 23 относятся к пожарным опасностям, 18 — к общим профессиональным рискам и 6 — к комбинированным опасностям, требующим специального рассмотрения (таблица 2).

Таблица 2

Результаты интегрированной идентификации опасностей

Тип опасности	Количество выявленных опасностей	Критический уровень риска	Требуемые меры управления
Пожарные	23	8	Технические и организационные
Профессиональные	18	5	Преимущественно организационные
Комбинированные	6	6	Комплексные меры

Результаты сравнения различных подходов к управлению рисками представлены в таблице 3.

Таблица 3

Сравнение эффективности различных подходов к управлению рисками

Показатель	Традиционный подход	Интегрированный подход
Количество выявленных опасностей	35	47
Точность оценки риска	0,75	0,92

Результаты расчета потенциального пожарного риска по контрольным точкам (А–Е) показаны на рис. 3. Анализ значений потенциального пожарного риска, рассчитанных по традиционной методике и с использованием предложенного интегрированного подхода, свидетельствует, что интегрированный подход обеспечивает более консервативную оценку риска во всех контрольных точках объекта. Наибольшее различие наблюдается в точке А, где интегрированная оценка превышает традиционную на 17 %, что связано с учетом дополнительных факторов, влияющих на развитие пожароопасных ситуаций. Такое различие в оценках подтверждает необходимость применения интегрированного подхода для получения более точной картины пожарных рисков на объектах нефтегазовой отрасли.

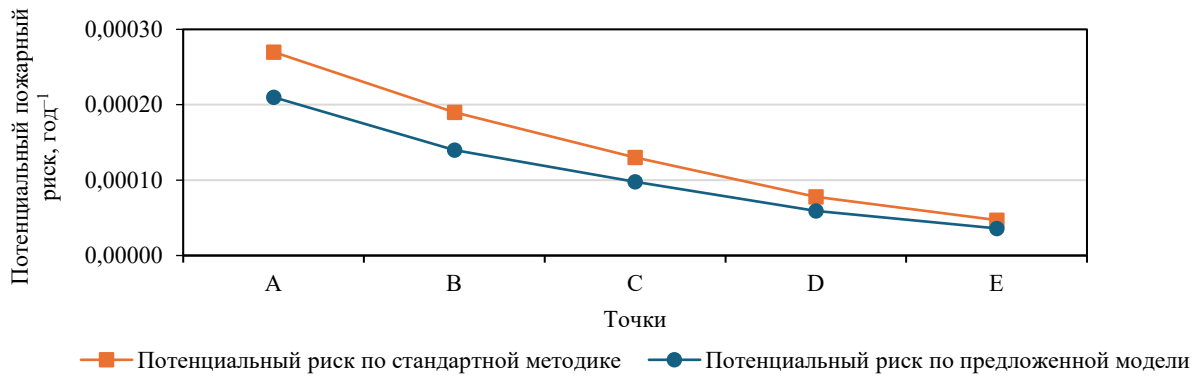


Рис. 3. Сравнение потенциального пожарного риска по контрольным точкам

Результаты расчета потенциального пожарного риска с учетом интеграции с СУОТ представлены в таблице 4.

Таблица 4

Значения интегрированного потенциального пожарного риска

Точка	Традиционная методика, год ⁻¹	Интегрированный подход, год ⁻¹	Снижение риска, %
A	$2,7 \times 10^{-4}$	$2,1 \times 10^{-4}$	22
B	$1,9 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-4}$	26
C	$1,3 \times 10^{-4}$	$9,8 \times 10^{-5}$	5
D	$7,8 \times 10^{-5}$	$5,9 \times 10^{-5}$	24
E	$4,7 \times 10^{-5}$	$3,6 \times 10^{-5}$	23

Сравнительный анализ результатов подтвердил, что интегрированный подход снижает расчетные значения потенциального пожарного риска во всех контрольных точках (А–Е), по сравнению с традиционной методикой. Наибольшее снижение получено в точке В (26 %), наименьшее — в точке С (5 %), что отражает различия в технологической нагрузке и условиях формирования пожароопасных сценариев в соответствующих зонах объекта.

Данные сравнительного анализа индивидуального пожарного риска для различных категорий работников представлен на рис. 4. График наглядно демонстрирует различия в уровне риска по традиционной методике и предложенной интегрированной модели для всех категорий персонала. Наибольшие значения риска характерны для операторов технологических установок, что обусловлено их непосредственным контактом с пожароопасным оборудованием и веществами. Интегрированная модель показывает увеличение оценочного риска на 22–29 % для всех категорий работников, по сравнению со стандартной методикой. Это различие особенно важно для операторов и обслуживающего персонала, поскольку их риск приближается к предельно допустимому значению 10–4 год⁻¹, установленному для производственных объектов со спецификой функционирования технологических процессов согласно приказу МЧС России № 533.

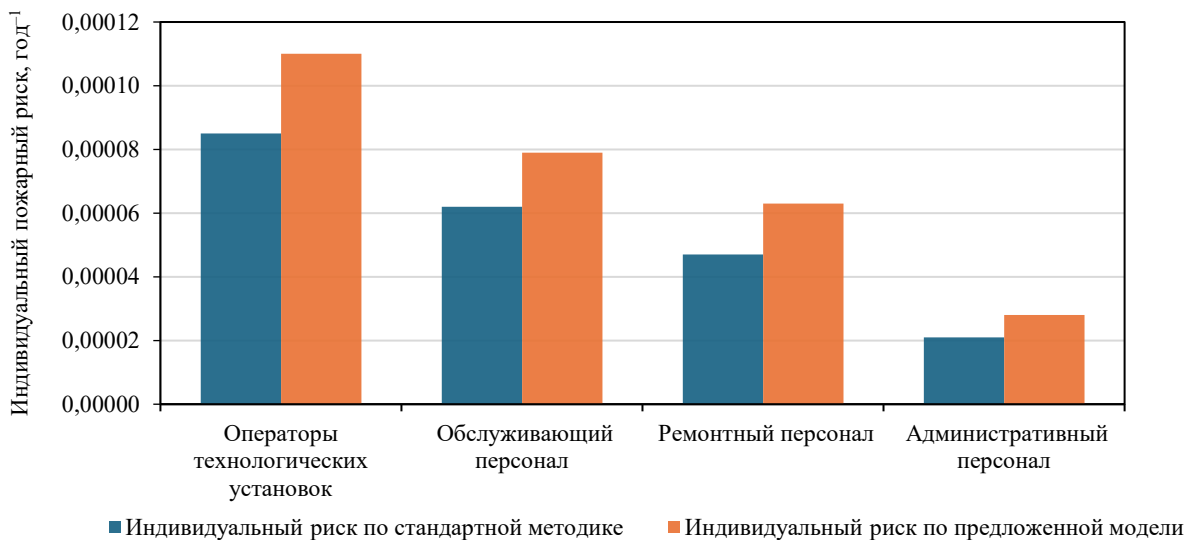


Рис. 4. Индивидуальный пожарный риск по категориям работников

Для оценки вклада различных элементов СУОТ в снижение пожарного риска был проведен анализ эффективности отдельных мероприятий. Наибольший эффект в снижении пожарного риска обеспечивает контроль состояния оборудования, что объясняется важностью его технического состояния для предотвращения разгерметизации и утечек. Обучение персонала показал второй по эффективности результат (18 % снижения), при этом он характеризуется наилучшим соотношением эффективность/стоимость. Анализ соотношения эффективности и затрат позволяет оптимизировать распределение ресурсов при внедрении мероприятий СУОТ.

Динамика изменения индивидуального пожарного риска в процессе поэтапного внедрения интегрированной системы представлена на рис. 5. График демонстрирует постепенное снижение риска для всех категорий работников по мере реализации элементов СУОТ. Наиболее значительное снижение риска наблюдается на этапе внедрения системы контроля, что подтверждает критическую важность мониторинга состояния оборудования и соблюдения требований безопасности. Операторы технологических установок, как наиболее подверженные рискам, показывают наибольшее абсолютное снижение риска — с $1,1 \times 10^{-4}$ до $6,3 \times 10^{-5}$ год⁻¹. Полная интеграция всех элементов СУОТ обеспечивает достижение целевых значений риска для всех категорий работников.

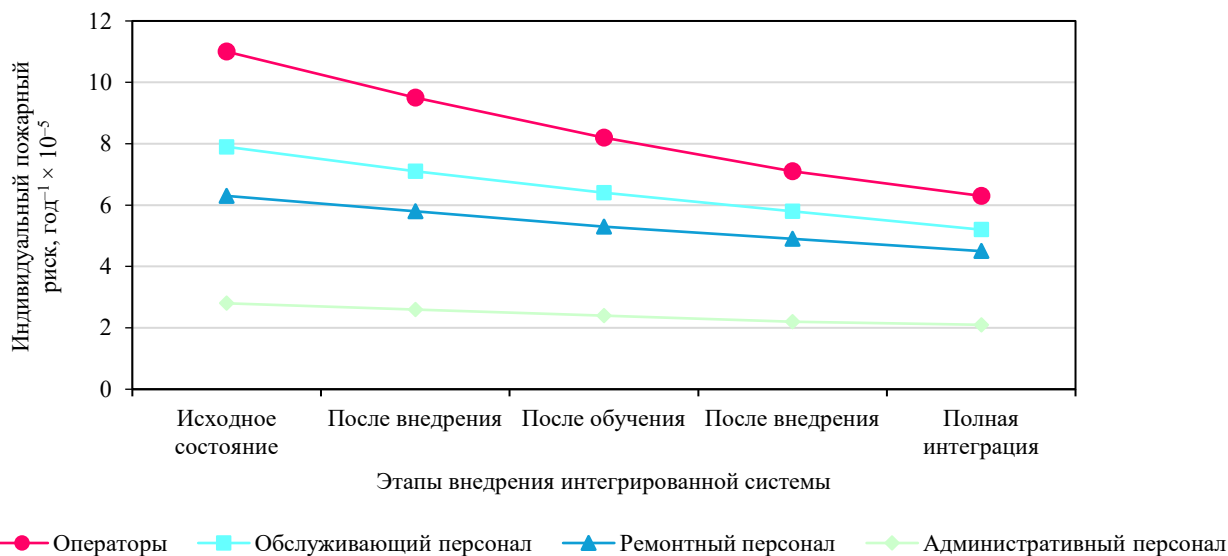


Рис. 5. Динамика снижения индивидуального пожарного риска при внедрении интегрированной системы

Обсуждение. Интегрированная вероятностно-статистическая модель оценки рисков, учитывающая элементы системы управления охраной труда и пожарной безопасностью (СУОТ), позволяет количественно оценивать динамику рисков при поэтапном внедрении мероприятий. Применение модели на объектах нефтегазовой отрасли подтвердило ее пригодность для анализа влияния как технических, так и организационных решений на уровень пожарной и производственной безопасности. Результаты показали, что исходные (базовые) значения рисков без действия элементов СУОТ могут быть существенно выше традиционно принимаемых оценок из-за учета большого числа сценариев, отказов и человеческого фактора. Вместе с тем пошаговое внедрение мер, предусмотренных системой управления, обеспечивает заметное снижение как потенциальных, так и индивидуальных пожарных рисков до допустимых ориентиров. Это подчеркивает важность перехода от формального выполнения требований к управлению на основе количественных показателей.

Особое значение имеют система контроля технического состояния оборудования, своевременное техническое обслуживание, обучение и подготовка персонала. Моделирование продемонстрировало, что именно эти элементы обладают наибольшим эффектом в снижении частоты иницирующих событий и ошибочных действий, при этом характеризуются благоприятным соотношением «эффективность — затраты». Учет их влияния в интегрированной модели позволяет обосновывать приоритеты при планировании мероприятий и распределении ресурсов.

Сравнение с международными стандартами показало, что предложенная методика в значительной степени соответствует современным требованиям в области управления промышленной и профессиональной безопасностью. Она может рассматриваться как практический инструмент адаптации действующих систем управления к актуальным нормативным требованиям и к увеличению прозрачности принимаемых решений. Разработанная методика в значительной степени согласуется с требованиями ГОСТ Р ИСО 45001–2020, а также с современными подходами к риск-ориентированному управлению безопасностью, реализованный подход обеспечивает выполнение большей части положений стандарта, чем использование традиционного подхода. Интеграция с элементами HAZOP-анализа позволила повысить качество идентификации опасностей, по сравнению с использованием стандартных процедур.

Вместе с тем, разработанная методика имеет определённые ограничения в применении. Она предназначена для объектов с непрерывным технологическим процессом и требует наличия базы данных по авариям за период не менее трех лет и определенной специфики технологических процессов, при которых обеспечивается корректность заложенных допущений. Эффективность подхода снижается при численности персонала менее 50 человек. Также методика не учитывает специфику морских объектов и объектов, расположенных в условиях вечной мерзлоты. Это требует осторожности при переносе разработанной модели на объекты с иными условиями эксплуатации.

По результатам исследования в Федеральной службе по интеллектуальной собственности зарегистрирована программа для ЭВМ «Программа анализа состояния обеспечения производственной безопасности» [13], что расширяет возможности ее внедрения на различных производственных объектах, в том числе за счет автоматизации расчетов и формирования отчетной документации

Заключение. Проведенное исследование показало, что интеграция процедур оценки пожарного риска по методике МЧС России № 533 с процессами управления профессиональными рисками в системе управления охраной труда (приказ Минтруда России № 776н) является эффективным инструментом повышения безопасности труда на предприятиях нефтегазовой отрасли. Интегрированный подход позволяет рассматривать пожарную безопасность и охрану труда как элементы единого контура управления рисками.

Сформирована интегрированная матрица опасностей, учитывающая классификацию по Федеральному закону № 123-ФЗ и связывающая ее с профессиональными рисками нефтегазовых объектов. Применение матрицы увеличило количество выявленных опасностей с 35 до 47, в том числе комбинированных, требующих специальных комплексных мер, что подтверждает более полную идентификацию рисков.

Разработана математическая модель интегрированной оценки пожарных рисков с коэффициентом интеграции с СУОТ и модифицированной формулой частоты реализации пожароопасных сценариев с учётом эффективности мероприятий СУОТ. Валидация с использованием экспертных оценок и статистических методов (коэффициент конкордации Кендалла, ANOVA, корреляционный анализ) показала достаточную согласованность и обоснованность принятых коэффициентов.

Практическая апробация на объектах нефтегазовой отрасли продемонстрировала повышение точности оценки рисков с 0,75 до 0,92 и снижение уровней пожарного риска при поэтапном внедрении элементов СУОТ, особенно систем контроля технического состояния оборудования и обучения персонала.

Перспективы дальнейших исследований связаны с адаптацией методики к объектам с особыми режимами работы и повышенной опасностью, расширением перечня учитываемых сценариев, а также более детальной интеграцией аспектов человеческого фактора и цифровизации мониторинга: использование систем онлайн-контроля, интеллектуальной диагностики и аналитики больших данных.

В целом предложенный подход формирует основу для совершенствования практик управления пожарной и производственной безопасностью в нефтегазовой отрасли, обеспечивая более обоснованное принятие решений по снижению рисков.

Список литературы / References

1. Гвоздев ЕВ. Межсистемное взаимодействие и связи в системе комплексной безопасности, предназначенной для предупреждения аварий и пожаров на взрывопожароопасных предприятиях. *Безопасность труда в промышленности*. 2024;12:40–46. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-12-40-46>
2. Gvozdev EV. Intersystem Interaction and Relationships in the Integrated Safety System Designed to Prevent Accidents and Fires at Explosion- and Fire-Hazardous Enterprises. *Occupational Safety in Industry*. 2024;12:40–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-12-40-46>
3. Гвоздев Е.В. Развитие методологии управления риском на взрывопожароопасных объектах предприятий. *Безопасность труда в промышленности*. 2023;8:61–69. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2023-8-61-69>
4. Gvozdev EV. Development of the Risk Management Methodology at the Fire Explosive Facilities of the Enterprises. *Occupational Safety in Industry*. 2023;8:61–69. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2023-8-61-69>
5. Bazaluk O, Tsopa V, Okrasa M, Pavlychenko A, Cheberiyachko S, Yavorska O, et al. Improvement of the Occupational Risk Management Process in the Work Safety System of the Enterprise. *Frontiers in Public Health*. 2023;11:1330430. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1330430>
6. Milea A, Moraru R-I, Cioca L-I. Occupational Risk Management through the Lens of the Sustainable Development Goals (SDGs): An Integrated Approach to Promoting Sustainability in the Workplace. *Sustainability*. 2025;17(5):1864. <https://doi.org/10.3390/su17051864>
7. Tazim Ahmed, Hoque ASM, Chitra Lekha Karmaker, Shamsuddin Ahmed. Integrated Approach for Occupational Health and Safety (OHS) Risk Assessment: An Empirical (Case) Study in Small Enterprises. *Safety Science*. 2023;164:106143. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106143>

6. Ramos D, Afonso P, Rodrigues MA. Integrated Management Systems as a Key Facilitator of Occupational Health and Safety Risk Management: A Case Study in a Medium Sized Waste Management Firm. *Journal of Cleaner Production*. 2020;262:121346. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121346>

7. Солодовников А.В., Шабанова В.В., Абдрахманов Н.Х., Набиева Ю.Р. Разработка процедуры управления профессиональными рисками на предприятии нефтегазового комплекса. Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2022;2(136):118–128. <http://doi.org/10.17122/ntj-oil-2022-2-118-128>

Solodovnikov AV, Shabanova VV, Abdrakhmanov NKh, Nabieva YuR. Development of Professional Risk Management Procedure at Petroleum Industry Enterprise. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2022;2(136):118–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2022-2-118-128>

8. Lahuta P, Kardos P, Hudáková M. Integrated Risk Management System in Transport. *Transportation Research Procedia*. 2021;55:1530–1537 <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.142>

9. Самчук-Хабарова Н.Я., Гапонов В.Л. Совершенствование методики управления профессиональными рисками. *Безопасность труда в промышленности*. 2024;3:26–32. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-3-26-32>

Samchuk-Khabarova NTa, Gaponov VL. Improving the Occupational Risk Management Methodology. *Occupational Safety in Industry*. 2024;3:26–32. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2024-3-26-32>

10. Laszcz-Davis C. Enterprise Risk Management. In book: *Handbook of Occupational Safety and Health*, 3rd Edition. Wiley; 2019. <https://doi.org/10.1002/9781119581482.CH12>

11. Салихова А.Х., Шварев Е.А., Самойлов Д.Б., Лазарев А.А. Рекомендации по определению частоты реализации пожароопасных ситуаций на технологическом оборудовании с пожаровзрывоопасными технологическими средами. *Современные проблемы гражданской защиты*. 2023;3(48):107–115.

Salikhova AH, Shvarev EA, Samoilov DB, Lazarev AA. Recommendations for Determining the Frequency of Fire Hazardous Situations on Technological Equipment with Fire and Explosion Hazardous Technological Environments. *The Journal Modern Problems of Civil Protection*. 2023;3(48):107–115. (In Russ.)

12. Фомичев Л.Ю. База данных нарушений требований пожарной и промышленной безопасности. Патент РФ, № 2025621409. 2025.

Fomichev LYu. *Database of Violations of Fire and Industrial Safety Requirements*. RF Patent No. 2025621409. 2025. (In Russ.)

13. Фомичев Л.Ю. Программа анализа состояния обеспечения производственной безопасности. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ РФ, №2024691025. 2024.

Fomichev LYu. *Program for Analyzing the State of Industrial Safety*. RF Certificate of State Registration of a Computer Program No. 2024691025. 2024. (In Russ.)

Об авторах:

Леонид Юрьевич Фомичев, аспирант кафедры промышленной безопасности и охраны окружающей среды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина (119991, Российская Федерация, г. Москва, просп. Ленинский, 65, корп. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), fomichev.lu@yandex.ru

Ирина Анатольевна Минаева, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной безопасности и охраны окружающей среды Российского государственного университета нефти и газа им. И.М. Губкина (119991, Российская Федерация, г. Москва, просп. Ленинский, 65), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [Scopus ID](#), i.a.minaeva@yandex.ru

Станислав Петрович Сухарский, аспирант кафедры комплексной безопасности в строительстве Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское шоссе, 26), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), stanislav-07@inbox.ru

Сергей Васильевич Батманов, кандидат технических наук, доцент кафедры комплексной безопасности в строительстве Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское шоссе, 26), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), svbatmanov@gmail.com

Ярослав Максимович Кузнецов, студент кафедры теплогоснабжения и вентиляции Института инженерно-экологического строительства и механизации Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское шоссе, 26), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), aroslavkuznecov35@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Л.Ю. Фомичев: разработка концепции, проведение исследования.

И.А. Минаева: предоставление ресурсов, разработка методологии, научное руководство.

С.П. Сухарский: формальный анализ, курирование данных, валидация результатов.

С.В. Батманов: разработка концепции, написание рукописи, внесение замечаний и исправлений.

Я.М. Кузнецов: написание черновика рукописи, визуализация.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Leonid Yu. Fomichev, Postgraduate Student of the Department of Industrial Safety and Environmental Protection, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Avenue, Building 1, Moscow, 119991, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), i.a.minaeva@yandex.ru

Irina A. Minaeva, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial Safety and Environmental Protection, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Avenue, Building 1, Moscow, 119991, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), [Scopus ID](#), i.a.minaeva@yandex.ru

Stanislav P. Sukharsky, Postgraduate Student of the Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), stanislav-07@inbox.ru

Sergei V. Batmanov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Integrated Safety in Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [Scopus ID](#), svbatmanov@gmail.com

Yaroslav M. Kuznetsov, Student of the Department of Heat, Gas, and Water Supply and Ventilation, Institute of Engineering and Environmental Construction and Mechanization, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (26 Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russia), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ResearcherID](#), aroslavkuznecov35@gmail.com

Claimed Contributorship:

LYu Fomichev: conceptualization, investigation.

IA Minaeva: resources, methodology, supervision.

SP Sukharsky: formal analysis, data curation, validation.

SV Batmanov: conceptualization, writing – review & editing.

YaM Kuznetsov: writing – original draft, visualization.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 20.11.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 15.12.2025

Принята к публикации / Accepted 12.01.2026

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

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

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 термощиков 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).

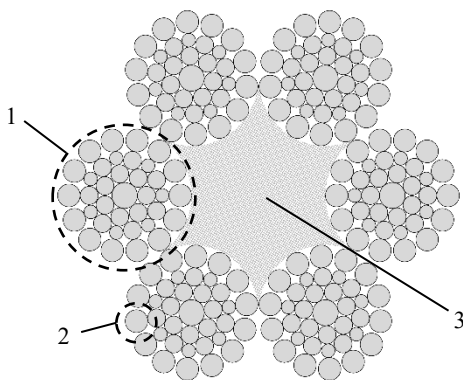


Рис. 1. Поперечное сечение стального каната $6 \times 36(1+7+7/7+14)+1$ о.с. ЛК-РО по ГОСТ 7668–80:
1 — прядь; 2 — проволока; 3 — органический сердечник

Таблица 1

Конструкция пряди стального каната 27 мм 6×36 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 27.102–2021¹ 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 012–97², 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)

¹ 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 (дата обращения: 20.10.2025).

² 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).

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).

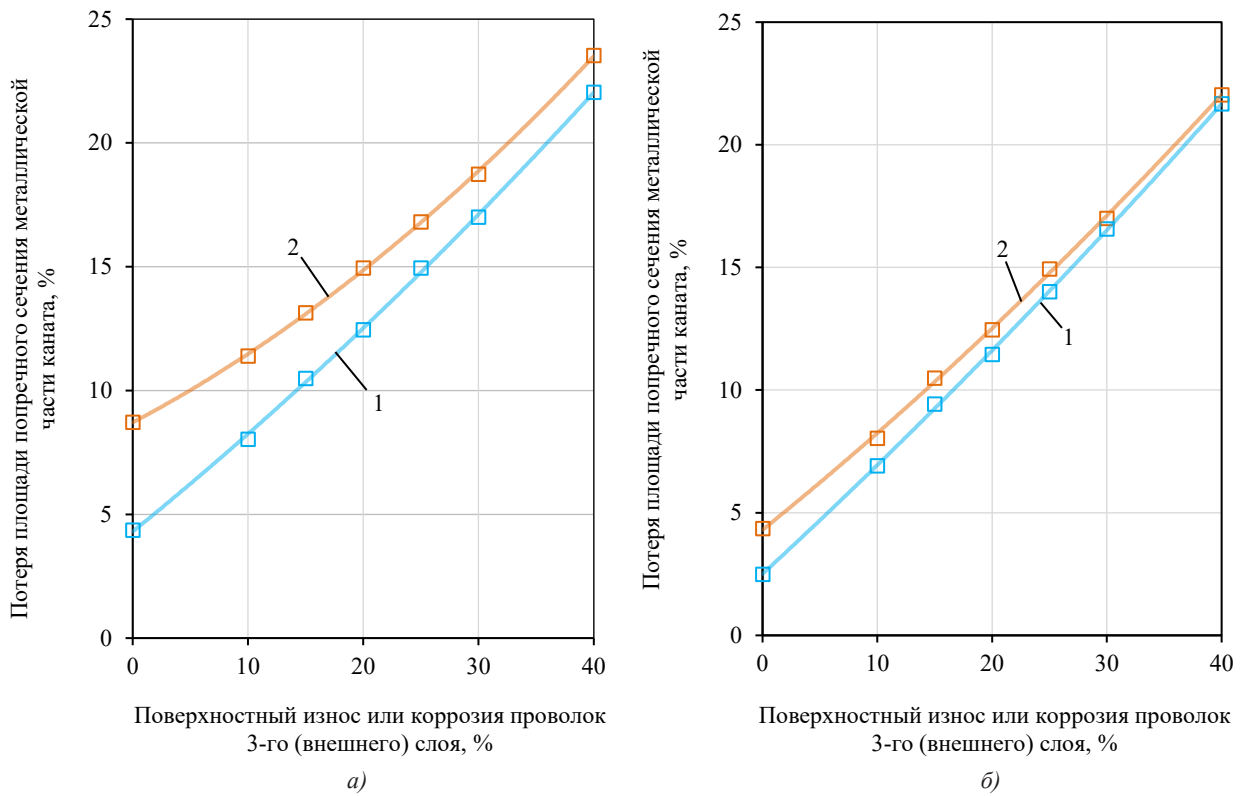


Рис. 2. Зависимость потерь площади поперечного сечения металлической части каната от числа обрывов, поверхностного износа или коррозии проволок 3-го (внешнего) слоя для группы классификации (режима) механизма М1–М4: *a* — крестовая свивка; *б* — односторонняя свивка; 1 — на участке длиной $6d$; 2 — на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

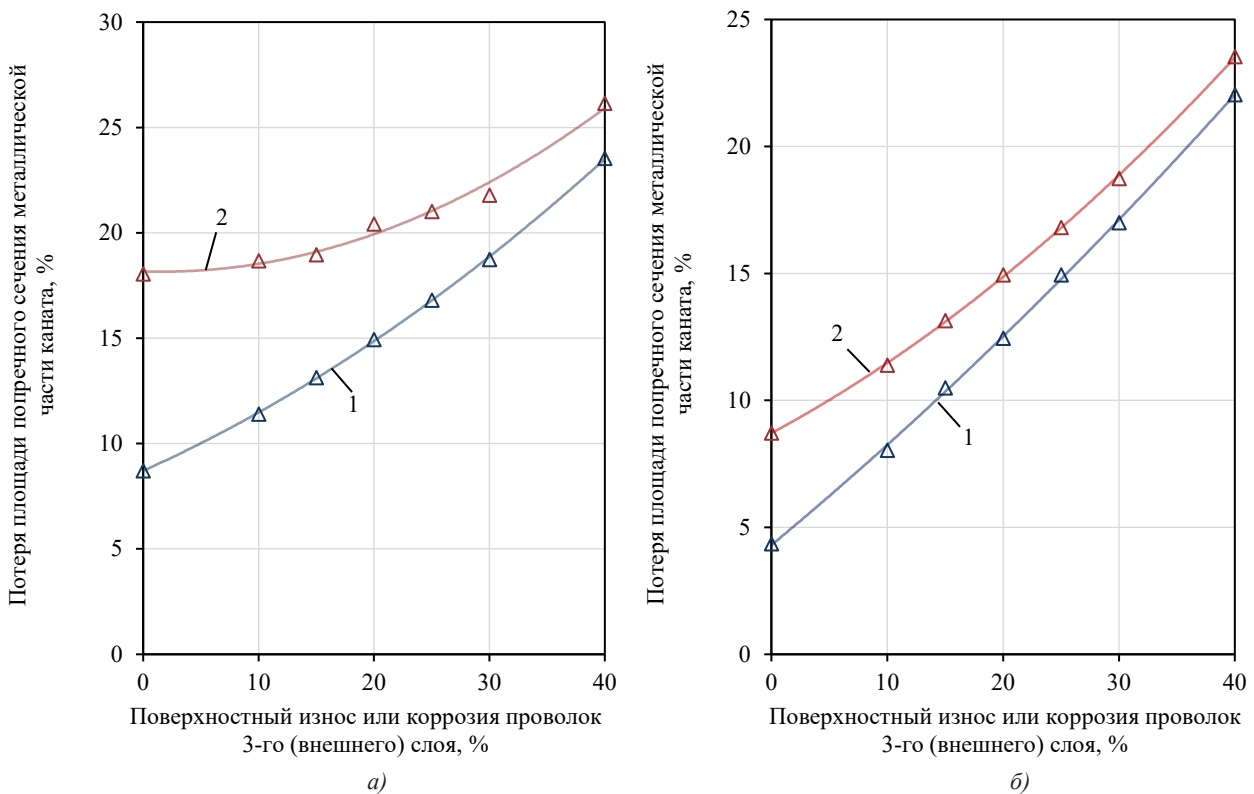


Рис. 3. Зависимость потерь площади поперечного сечения металлической части каната от числа обрывов, поверхностного износа или коррозии проволок 3-го (внешнего) слоя для группы классификации (режима) механизма М5–М8: *a* — крестовая свивка; *б* — односторонняя свивка; 1 — на участке длиной $6d$; 2 — на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

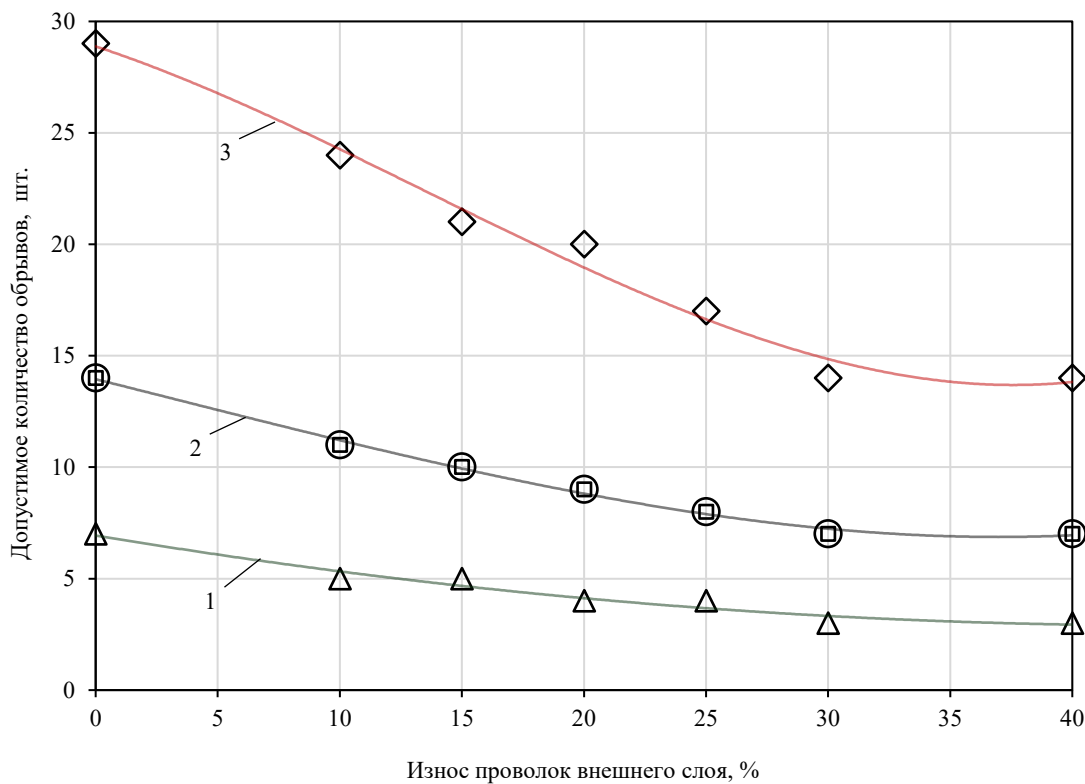


Рис. 4. Зависимость допустимого количества обрывов от износа и коррозии проволок внешнего слоя для группы классификации (режима) механизма М1-М4 для каната конструкции $6 \times 36(1+7+7/7+14)+1$ о.с. ЛК-РО ГОСТ 7668: 1 — односторонней свивки на участке $6d$ ($R^2 = 0,9617$); 2 — крестовой свивки на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

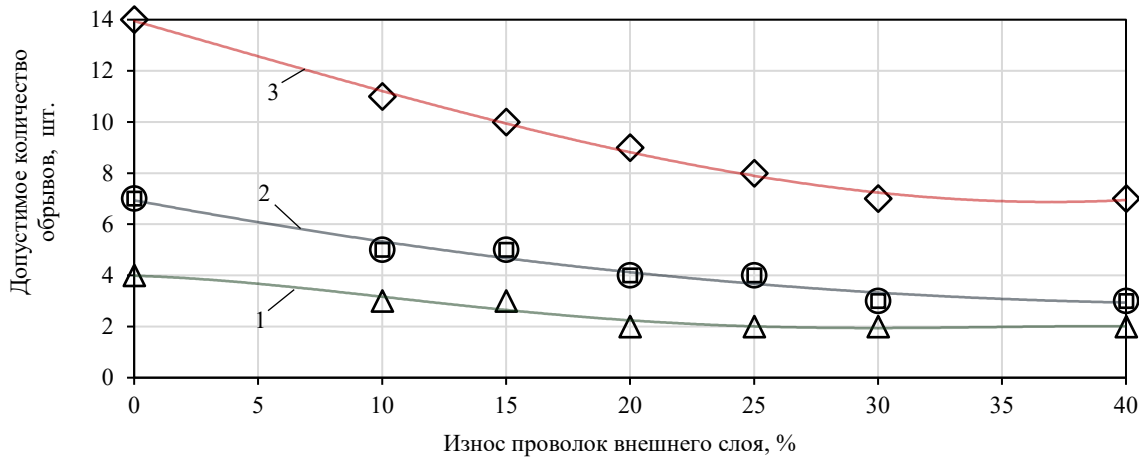


Рис. 5. Зависимость допустимого количества обрывов от износа и коррозии проволок внешнего слоя для группы классификации механизма М5-М8 для каната конструкции $6 \times 36(1+7+7/7+14) + 1$ о.с. ЛК-РО ГОСТ 7668: 1 — односторонней свивки на участке $6d$ ($R^2 = 0,9959$); 2 — крестовой свивки на участке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

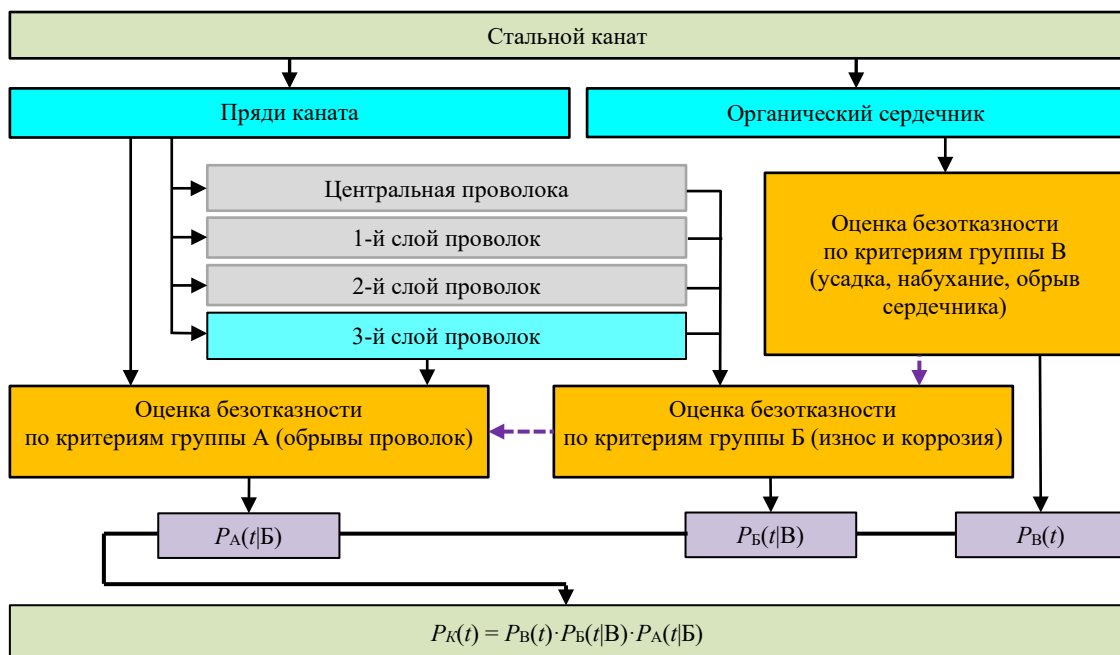


Рис. 6. Блок-схема модели прогнозирования надежности стального каната конструкции $6 \times 36(1+7+7/7+14) + 1$ о.с. ЛК-РО по ГОСТ 7668

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; β_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⁻¹; 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 η_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 ε_{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, мм²; ΔA_Σ — кумулятивная потеря площади поперечного сечения проволок внешних и внутренних слоев, мм²; $E[\Delta A_\Sigma]$ 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_ω — 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; δ — 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 9226³.

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:

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

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 ρ — 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:

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

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 ; $n_{\text{пр}}$ — 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 β_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); η_0 — характеристический ресурс нового каната при номинальном сечении A_0 , ч; A_0 — номинальная площадь сечения проволоки стального каната без износа, мм²; $A(t)$ — площадь сечения проволоки стального каната в момент времени t , мм².

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:

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

³ 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, ω — частота работы — количество циклов работы в час, 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:

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

где D/d — отношение диаметра роликов каретки к диаметру каната. S — натяжение каната, Н; R_0 — маркировочная группа прочности проволоки, Н/мм²; 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
$P_B(t)$	β_B	3	—
	q	68	МПа
	η_B	0,36	МПа·ч
	$k_{\text{дег.}}$	0.0004	ч^{-1}
	E_B	110	МПа
$P_B(t B)$	ϵ_{lim}	0,25	—
	δ	0,05	—
	H	5100	МПа
	$\sigma_{\text{кон.}}$	850	МПа
	k_f	$5,0 \cdot 10^{-7}$	—
	k_ω	$4,1 \cdot 10^{-8}$	—
	k_A	0,175	—
$P_A(t B)$	p	7,0	МПа
	$v_{\text{вар.}}$	0,15	—
	β_A	4	—
	η_0	3200	ч
$P_A(t B)$	A_0	283,79	мм ²
	m	6	—

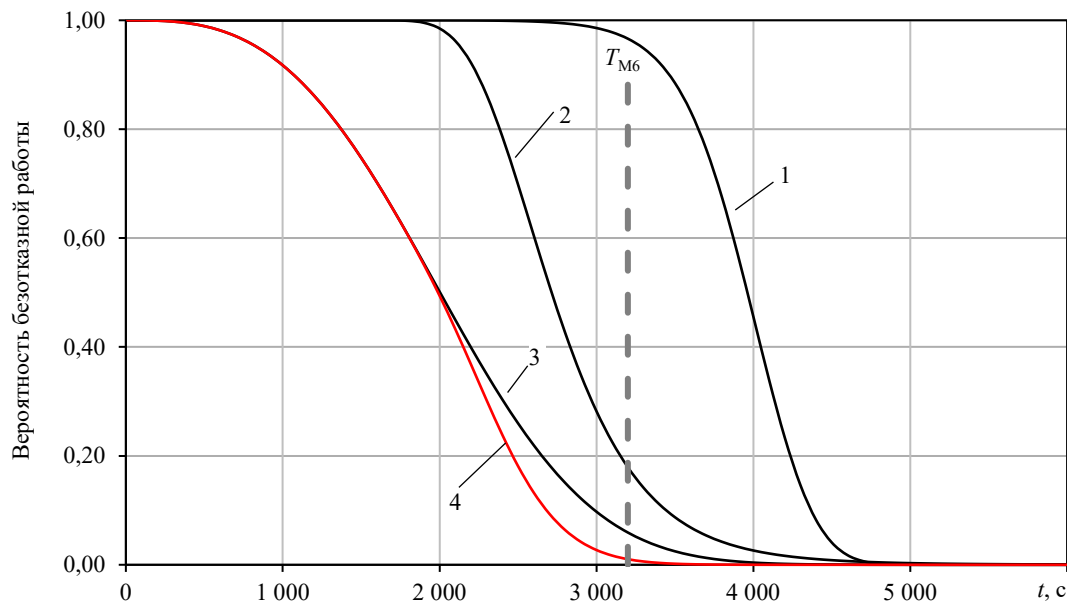


Рис. 7. Сравнение предиктивной оценки безотказности стального каната конструкции 6×36 ЛК-РО ГОСТ 7668-80 с расчетными значениями медианного ресурса

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 $P_V(t)$; 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 повреждаемости. 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
- 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
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

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

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

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 620.1:620.179.16

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-47-60>

Локальный градиентный индикатор магнитной изменчивости при циклическом нагружении сталей

 Д.Н. Шерматов , А.О. Борисов , В.А. Гафарова ✉, И.Р. Кузеев 

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация

✉ gafarova.vika@bk.ru

EDN: BZBQLB

Аннотация

Введение. Усталостное разрушение является одной из основных причин выхода из строя металлоконструкций, работающих под воздействием переменных нагрузок. На ранних стадиях такие повреждения не сопровождаются видимыми трещинами, однако приводят к накоплению микродефектов и перераспределению внутренних напряжений. Проследить за развитием таких дефектов в конструкциях с большой протяженностью и необходимостью контроля большой площади поверхности в настоящее время не представляется возможным. Для своевременного выявления этих процессов необходимы высокочувствительные методы контроля, которые способны на ранних стадиях функционирования конструкции определить с высокой долей вероятности возможное место разрушения. Такие методы не развиты, и представленные исследования в определенной степени могут решить эту проблему. Одним из перспективных направлений является регистрация изменений напряжённости постоянного магнитного поля, отражающих эволюцию состояния материала. Цель настоящей работы — исследовать возможности пространственного анализа магнитного отклика для локализации зон нестабильности в процессе усталостного нагружения, в которых высока вероятность разрушения, и одновременно проанализировать изменения структуры стали.

Материалы и методы. Объектом исследования являлись образцы из стали 09Г2С, подвергнутые нагружению до разрушения на сервогидравлической испытательной машине INSTRON-8801. Магнитные измерения проводились в 12 точках вдоль образца с использованием прибора ИКН-2М-8. Фиксировались изменения результирующей напряжённости постоянного магнитного поля на различных стадиях усталостного нагружения. Все измерения повторялись не менее трёх раз для повышения достоверности результатов.

Результаты исследования. Установлено, что на стадии относительной наработки $N_i/N_p = 0,4–0,5$ в отдельных точках регистрировались аномальные изменения напряжённости магнитного поля, соответствующие зоне зарождения очага разрушения. Кроме того, зафиксирован характерный участок стабилизации сигнала в диапазоне $N_i/N_p = 0,8–0,9$, что может быть связано с временной релаксацией напряжений перед разрушением. Полученные данные демонстрируют локальную вариативность магнитного отклика и подтверждают чувствительность метода к ранним стадиям деградации материала.

Обсуждение. Проведённое исследование показало, что пространственный анализ изменения напряжённости постоянного магнитного поля может быть использован для локализации очагов разрушения в ферромагнитных сталях. Представляется возможным полученный массив данных положить в основу обучающих выборок для интеллектуальных систем мониторинга, включая нейросетевые алгоритмы, ориентированные на прогнозирование остаточного ресурса и автоматическую оценку технического состояния конструкций. Особенно это важно для сварных конструкций с большой протяженностью сварных швов.

Заключение. Введение в систему энергии неизбежно приводит к реорганизации структуры конструкционного материала с целью приспособления к внешнему воздействию. Реорганизация сопровождается изменением собственного магнитного поля материала. Фиксация таких изменений позволяет интерпретировать результаты измерений с позиции возможного разрушения, поскольку наиболее эффективным способом реализации поступившей в систему энергии является образование новой поверхности, то есть образование трещины.

Ключевые слова: магнитный контроль, усталостные повреждения, локализация очага разрушения, ферромагнитные материалы, распределение магнитной напряжённости, приповерхностный слой, остаточные напряжения, доменная структура, деградация материала, мультифракталы

Благодарности. Авторы благодарят редакцию журнала за оперативную подготовку статьи к публикации и за ценные замечания, устранение которых позволило улучшить её содержание.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта проекта Российского научного фонда по соглашению № 25–29–00200 от 28.12.2024 «Прогнозирование уровня деградации свойств сварных соединений с помощью искусственного интеллекта для выявления и предотвращения аварийных ситуаций».

Для цитирования. Шерматов Д.Н., Борисов А.О., Гафарова В.А., Кузеев И.Р. Локальный градиентный индикатор магнитной изменчивости при циклическом нагружении сталей. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2026;10(1):47–60. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-47-60>

Original Empirical Research

Local Gradient Indicator of Magnetic Variability under Cyclic Loading of Steels

Dzhamshed N. Shermatov , Alexander O. Borisov , Victoria A. Gafarova ✉, Iskander R. Kuzeev 

Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russian Federation

✉ gafarova.vika@bk.ru

Abstract

Introduction. Fatigue failure is one of the main causes of failure of metal structures subjected to variable loads. Initially, this damage is not visible as cracks, but it leads to the accumulation of microdefects and the redistribution of internal stresses. Currently, it is not possible to monitor the progression of these defects in large structures with a significant surface area. To detect such processes in a timely manner, highly sensitive inspection methods are required that can identify potential areas of failure with a high degree of accuracy during the early stages of structural operation. Such methods do not currently exist, and our research aims to solve this problem to a certain extent. One promising approach is the monitoring of changes in the strength of a permanent magnetic field, which reflects the evolution of material state. The current study aims to investigate the potential of spatial analysis of magnetic response to identify instability zones during fatigue loading, where the likelihood of failure is high, as well as to analyze changes in steel structure.

Materials and Methods. The study focused on samples made of 09G2S steel, subjected to loading to fracture on a servohydraulic testing machine INSTRON-8801. Magnetic measurements were taken at 12 points along the sample using an IKN-2M-8 instrument. Changes in the resulting strength of the permanent magnetic field were recorded at different stages of fatigue loading. All measurements were repeated at least three times to ensure the reliability of the results.

Results. It has been found, that at the stage of relative operating time $N_i/N_p = 0.4–0.5$, anomalous changes in the magnetic field strength corresponding to the fracture nucleus were recorded at certain points. Additionally, a characteristic area of signal stabilization was observed in the range $N_i/N_p = 0.8–0.9$. This could be explained by the temporary relaxation of stresses prior to destruction. The obtained data demonstrate the local variability of the magnetic response and confirm the sensitivity of this method to the early stages of material degradation.

Discussion. The conducted research has shown that spatial analysis of changes in the strength of a permanent magnetic field can be used to locate fracture nuclei in ferromagnetic steels. This dataset can be used as a basis for training samples for intelligent monitoring systems, including neural network algorithms that focus on predicting the remaining life and automatically assessing the technical condition of structures. This is particularly important for welded structures with a high number of welds.

Conclusion. The introduction of energy into a system inevitably leads to a reorganization of the structure of the material in order to adapt to external forces. This reorganization is accompanied by a change in the material's magnetic field. By recording these changes, it is possible to interpret the measurement results in terms of possible destruction, as the most efficient way for the system to utilize the supplied energy is through the formation of new surfaces, or cracks.

Keywords: magnetic test, fatigue damage, localization of fracture nucleus, ferromagnetic materials, distribution of magnetic tension, near-surface layer, residual stresses, domain structure, degradation of the material, multifractals

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board of the journal for their prompt review of the article and valuable comments that helped the authors to improve its quality.

Funding Information. The research was done with the financial support of a grant from the Russian Science Foundation project under Agreement No. 25–29–00200 dated December 28, 2024, titled “Forecasting the degradation level of properties of welded joints using artificial intelligence to identify and prevent emergencies”.

For Citation. Shermatov DN, Borisov AO, Gafarova VA, Kuzeev IR. Local Gradient Indicator of Magnetic Variability under Cyclic Loading of Steels. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(1):47–60. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-47-60>

Введение. Актуальность задачи надёжной оценки остаточного ресурса металлоконструкций определяется необходимостью одновременно обеспечить высокий уровень промышленной безопасности и оптимизировать эксплуатационные расходы. Особенно остро эта проблема стоит для протяжённых сварных оболочек, резервуаров и трубопроводов, где необходимо контролировать большую площадь поверхности и значительные объёмы металла в условиях ограниченного доступа и сложных нагрузочных режимов.

Традиционные методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, радиографический, акустико-эмиссионный и др.) эффективно выявляют сформировавшиеся дефекты типа макротрещин и несплошностей, однако имеют ряд ограничений при ранней диагностике усталостного повреждения. Они, как правило, требуют тщательной подготовки поверхности и значительных трудозатрат, плохо приспособлены к экспресс-картированию протяжённых сварных швов и зачастую дают интегральную оценку состояния без возможности локализовать зоны начальной деградации и градиенты остаточных напряжений. Поэтому значительная часть ресурса конструкции расходуется вслепую, а потенциально опасные зоны могут оставаться незамеченными до стадии развития макротрещин.

На этом фоне возрастает интерес к методам, основанным на регистрации собственных физических полей материала, которые чувствительны к эволюции внутреннего состояния без непосредственного введения энергии в контролируемый объём. Одним из наиболее перспективных является анализ распределения напряжённости постоянного (остаточного) магнитного поля, формируемого в ферромагнитных сталях при накоплении повреждений и перераспределении остаточных напряжений. Магнитные методы обладают рядом важных преимуществ: возможность дистанционных измерений, высокая скорость обследования больших площадей и чувствительность к ранним стадиям перераспределения напряжений и дефектов, когда ещё отсутствуют макротрещины [1].

Надёжная диагностика остаточного ресурса металлоконструкций в этой постановке опирается на детальный анализ микроскопических изменений, происходящих в структуре материала в процессе накопления усталостных повреждений. Одними из наиболее чувствительных и информативных носителей таких сведений выступают собственные магнитные поля материала, формирующиеся в результате перераспределения доменной структуры. Изменения доменной конфигурации интегрально отражают сочетание микроструктурных превращений и эволюции остаточных напряжений, а значит, могут служить основой для построения высокочувствительных диагностических критериев.

В ферромагнитных материалах наблюдаются значимые различия магнитной доменной структуры вблизи поверхности и в объёме. В частности, экспериментальные исследования показали, что у поверхности доменные стенки могут быть существенно шире, чем внутри материала. Это приводит к снижению плотности магнитной энергии в стенке и, как следствие, влияет на подвижность доменных границ и их чувствительность к локальным механическим напряжениям и дефектам [2]. Таким образом, можно заключить, что поверхностные слои обладают особыми магнитными характеристиками, отличными от объёмных, что необходимо учитывать при анализе магнитной текстуры материала.

Прямая визуализация внутренних доменных структур в объёме твёрдых материалов остаётся крайне затруднённой из-за ограниченного пространственного разрешения большинства магнитных микроскопических методов. Такие методы, как магнитооптическая визуализация или магнитная силовая микроскопия, эффективно фиксируют магнитную морфологию лишь на поверхности образца. Для исследования трёхмерной магнитной структуры применяются косвенные подходы. Классические микромагнитные модели и многомасштабные численные схемы позволяют прогнозировать конфигурации доменов и их динамику, учитывая как локальные магнитные поля, так и кристаллографические особенности материала. Внедрение, например, дислокационных напряжений в микромагнитную симуляцию демонстрирует, как дислокации могут служить центрами закрепления доменных границ и влиять на эффект Баркгаузена [2].

Отдельно стоит отметить новейшие методы реконструкции магнитной структуры на основе машинного обучения. В работе [3] представлена модель на основе свёрточной нейронной сети (MagNet), которая повышает точность восстановления трёхмерной конфигурации намагниченности по данным томографии. Данный подход преодолевает ограничения классических алгоритмов векторной томографии, устраняя артефакты неполных данных и существенно улучшая качество реконструированного магнитного поля.

Аналогичный принцип применён в исследовании [4], где нейросетевая модель обучается преобразовывать изображения внешнего магнитного поля (например, карты поля утечки) в распределение вектора намагниченности внутри материала. Это позволяет восстанавливать сложные доменные текстуры с переменным направлением намагничивания, недоступные для традиционных методов инверсии [4]. Подобные нейросетевые подходы расширяют возможности интерпретации экспериментальных данных и приближают исследователей к прямой реконструкции внутренней магнитной текстуры по косвенным измерениям.

Микроструктура материала, включая распределение намагниченности, эволюционирует при накоплении пластической деформации в условиях циклического нагружения. Хотя современные измерительные методы не позволяют напрямую отслеживать перестройку отдельных доменов внутри объёма, совокупный магнитный отклик (например, петля гистерезиса) чувствителен к таким микроструктурным изменениям. Перестройка и перераспределение доменных границ на микроуровне проявляются в измеряемых вариациях магнитной проницаемости, коэрцитивной силы и других параметрах материала. Таким образом, анализ динамики магнитных характеристик под нагрузкой позволяет судить об изменениях внутренней структуры. Учет этих эффектов даёт возможность перейти от интегральной оценки состояния материала к локализованному анализу, нацеленному на раннее выявление зон, предрасположенных к развитию повреждений.

Внутреннее (объёмное) поведение материала при усталостной деформации существенно отличается от процессов, происходящих вблизи поверхности. В толще материала пластическая деформация распределяется более равномерно и градиенты остаточных напряжений значительно ниже, чем у поверхности [5]. В поликристаллическом объёме дислокации генерируются и накапливаются группами, вызывая значительные локальные напряжения, снятие которых затруднено из-за отсутствия свободной поверхности. Границы зёрен выполняют роль внутренней «поверхности», однако для выхода дислокаций через эти границы требуется преодоление энергетического барьера [6]. Лишь по достижении критического уровня накопленных напряжений и энергии дефектов [7] возможно зарождение микротрещин внутри материала. Эти особенности согласуются с концепцией Муга о релаксации внутренних напряжённых полей [8], а также с экспериментальными данными о неравномерном распределении остаточных напряжений (анизотропии напряжений) в сталях [9].

В отличие от объёма, свободная поверхность материала служит эффективным стоком для дислокаций, требуя гораздо меньше энергии для выхода дефектов. Этот факт объясняет, почему усталостные трещины чаще инициируются именно на поверхности. Следовательно, изменения, происходящие в приповерхностном слое в процессе нагружения, могут быть использованы как информативные диагностические признаки развивающейся деградации.

Одним из таких признаков является формирование на поверхности самоподобных (фрактальных) структур по мере развития повреждений. Как отметил Б. Мандельброт, подобные образования обладают свойством самоподобия на разных масштабных уровнях [10]. Действительно, морфология повреждённой поверхности металлов нередко описывается фрактальными характеристиками, которые можно количественно оценивать [11]. Анализ геометрии элементов рельефа на различных масштабах позволяет установить связь между поверхностными проявлениями усталости и протекающими в объёме процессами разрушения [12].

Неоднородность и шероховатость поверхности способны влиять и на магнитные свойства приповерхностного слоя. Согласно исследованиям, изменения фрактальной структуры деформированного материала коррелируют с его магнитными параметрами, такими как насыщенная намагниченность и магнитная проницаемость [11]. Иными словами, трансформация распределения физических свойств по мере роста повреждений может проявлять мультифрактальные черты. Отслеживание эволюции нескольких таких мультифрактальных параметров расширяет возможности диагностической интерпретации, позволяя более надёжно идентифицировать ранние стадии деградации материала.

Таким образом, анализ литературы подтверждает необходимость комплексного подхода к диагностике повреждений в ферромагнитных конструкционных материалах. Магнитные доменные структуры у поверхности и в объёме реагируют по-разному на присутствие дефектов и механических напряжений. Совмещение классических микромагнитных моделей с современными нейросетевыми методами реконструкции [3, 4] позволяет глубже анализировать внутренние изменения магнитной текстуры, недоступные прямому наблюдению. Одновременно учёт особенностей накопления повреждений (дислокационной структуры и остаточных напряжений) в объёме [5–9] и связанных с ними фрактальных признаков на поверхности [10–12] обеспечивает более полный контроль состояния материала. Синтез магнитных и фрактальных критериев деградации, подтверждённых литературными данными, открывает путь к созданию высокочувствительных методов неразрушающего контроля для раннего обнаружения зарождающихся дефектов.

Магнитные методы диагностики по распределению напряженности постоянного магнитного поля применяются для выявления зон концентрации напряжений и участков локальной деградации в ферромагнитных сталях. Их основа — чувствительность магнитного отклика к перераспределению остаточных напряжений и к дефектам, формирующим локальные неоднородности поля. Вместе с тем известные подходы часто используют интегральные показатели или одномерные профили вдоль выбранной линии и не обеспечивают строгой привязки пространственных аномалий поля к (i) стадии усталостного нагружения и (i) параметрам микроструктуры по толщине материала.

Однако до настоящего времени недостаточно исследовано, как локальные аномалии распределения результирующей напряжённости постоянного магнитного поля на поверхности конструкционных сталей количественно согласуются с изменением микроструктуры и с её мультифрактальными параметрами в приповерхностном слое и в объёме при циклическом нагружении. Отсутствие такой связи ограничивает формирование устойчивого диагностического признакового пространства для ранней локализации очага разрушения.

В этой связи целью настоящей работы является экспериментальное обоснование диагностического подхода, при котором пространственно-локализованные измерения результирующей напряжённости остаточного магнитного поля при циклическом изгибе стали 09Г2С сопоставляются с мультифрактальными параметрами микроструктуры, рассчитанными по микрофотографиям в характерных зонах по толщине.

Материалы и методы. Для исследования взяты образцы из низколегированной конструкционной стали 09Г2С, подвергавшиеся циклическому нагружению с целью моделирования условий эксплуатации элементов, работающих под переменными механическими воздействиями (например, резервуары, трубопроводы, несущие элементы металлоконструкций) (рис. 1). Для измерения напряженности постоянного магнитного поля был использован прибор ИКН-2М-8 (измеритель концентрации напряжений).

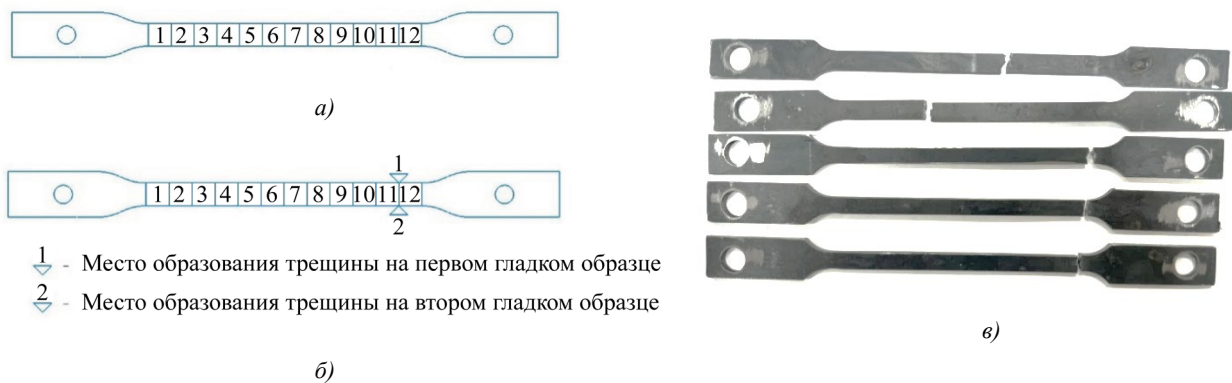


Рис. 1. Образцы для проведения испытаний: а — в исходном состоянии; б — места разрушения образцов; в — испытанные образцы

Магнитные измерения проводились в 12 точках с шагом 10 мм. На каждом уровне нагружения испытательная машина останавливалась и измерения выполнялись по согласованной схеме в фиксированных контрольных точках, что обеспечивало корректное сопоставление данных между циклами. Для оценки воспроизводимости и статистической надёжности результаты измерений регистрировались на пяти идентичных образцах, подвергнутых одинаковому режиму циклического нагружения. Это позволило подтвердить стабильность магнитного отклика и уменьшить влияние случайных факторов, связанных с локальной микроструктурной неоднородностью. Для повышения достоверности анализа все измерения повторялись не менее трёх раз в каждой точке.

После завершения циклических испытаний и фиксации разрушения из исследованных образцов были вырезаны участки для анализа микроструктурных изменений.

Фрактальный анализ микроструктуры использовался для установления взаимосвязи между структурной неоднородностью металла и локальными магнитными аномалиями, зафиксированными при измерении результирующей напряжённости постоянного магнитного поля H_r . Исследование микроструктуры проводилось на микрофотографиях, полученных в поперечном сечении разрушенного образца в трёх характерных зонах:

- в зоне, примыкающей к наружной поверхности;
- в центральной (объёмной) части;
- в зоне, примыкающей к очагу разрушения.

Дополнительно для сравнительного анализа использовались микроструктуры исходного состояния металла, полученные до циклического нагружения.

Микрофотографии каждой изучаемой зоны были получены при увеличении $\times 200$, $\times 500$ и $\times 1000$, что обеспечивало анализ структуры на различных масштабных уровнях. Обработку изображений проводили в программе *MFRDrom Fast*, разработанной профессором Г.В. Встовским [13, 14], в режиме Normalized By D_1 , с типом анализа Pseudo.

Для каждой зоны рассчитывались параметры, характеризующие фрактальную размерность, скрытую периодичность и степень однородности микроструктуры [13]. Их сопоставление между зонами по толщине образца и на различных масштабах позволило оценить пространственно-масштабную изменчивость структурной организации материала. Такой подход обеспечил возможность сопоставления градиента микроструктурной сложности с распределением магнитного отклика H_r , фиксируемого на соответствующих участках поверхности образца.

Результаты исследования. Получены результаты измерений результирующей напряжённости постоянного магнитного поля H_r на поверхности образцов при циклическом нагружении, а также результаты расчёта показателя локального изменения магнитной характеристики G_i . Уровень накопленных повреждений задавался относительной наработкой Ni/Np , где Ni — текущее число циклов, Np — число циклов до разрушения. Измерения выполнены на пяти образцах ($n = 5$), в каждой измерительной точке на каждом уровне Ni/Np проводилось три повтора ($m = 3$). Для каждой комбинации «точка — уровень Ni/Np » рассчитывались среднее значение и стандартное отклонение, на рис. 2, 3 представлены средние значения с планками погрешности. Паспортная погрешность измерительного прибора не превышала 10 %.

Зависимости H_r от Ni/Np для точек 1, 11 и 12 показаны на рис. 2. Во всём диапазоне Ni/Np значения H_r в точке 1 сохраняются на существенно более низком уровне, по сравнению с точками 11 и 12. В интервале $Ni/Np = 0,4-0,5$ фиксируется расхождение поведения H_r в точках 11 и 12: в точке 11 наблюдается снижение H_r относительно соседних уровней, тогда как в точке 12 — повышение H_r с формированием локального максимума. Различия между точками 11 и 12 в указанном интервале превышают величину разброса ($\pm SD$) и воспроизводятся по серии измерений ($n = 5$).

Для количественной оценки изменчивости магнитного отклика рассчитан показатель локального изменения G_i , его зависимости от Ni/Np для точек 1, 11 и 12 приведены на рис. 3. В диапазоне $Ni/Np = 0,2-0,6$ значения G_i в точках 11 и 12 существенно превышают значения, полученные в точке 1. Максимальные значения G_i в точках 11 и 12 наблюдаются при Ni/Np порядка 0,35–0,5, при дальнейшем росте Ni/Np фиксируется снижение G_i . В точке 1 значения G_i остаются на более низком уровне, без выраженных пиков, сопоставимых с точками 11 и 12. Таким образом, результаты магнитных измерений подтверждают пространственную неоднородность распределения H_r и локализацию наибольших изменений магнитной характеристики в области точек 11, 12 в интервале Ni/Np порядка 0,35–0,5 (рис. 2–3).

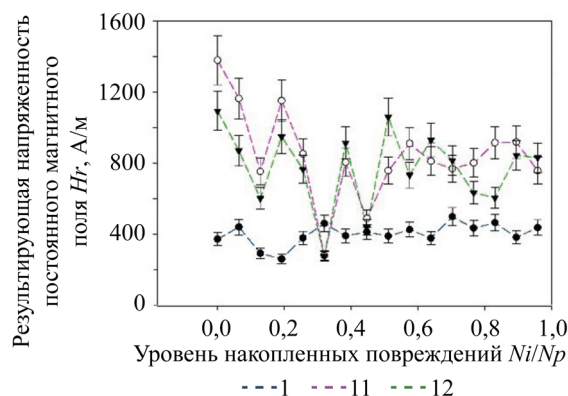


Рис. 2. Зависимость изменения результирующей напряжённости постоянного магнитного поля от уровня накопленных повреждений

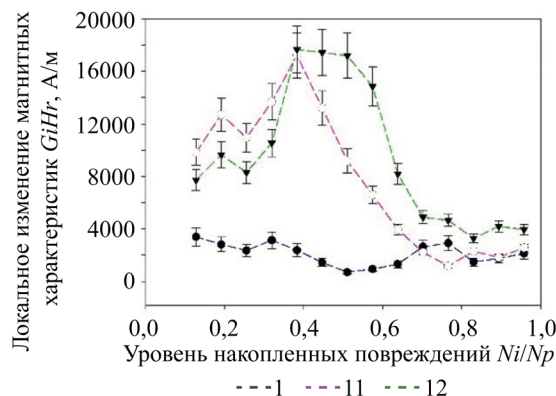


Рис. 3. Зависимость локального изменения результирующей напряжённости постоянного магнитного поля от уровня накопленных повреждений

Максимальные значения G_i в точках 11 и 12 наблюдаются при Ni/Np порядка 0,35–0,5, при дальнейшем росте Ni/Np значения G_i снижаются, и при $Ni/Np = 0,75$ фиксируется отчётливое уменьшение показателя (рис. 3). В точке 1 значения G_i остаются на более низком уровне, без выраженных пиков, сопоставимых с точками 11 и 12.

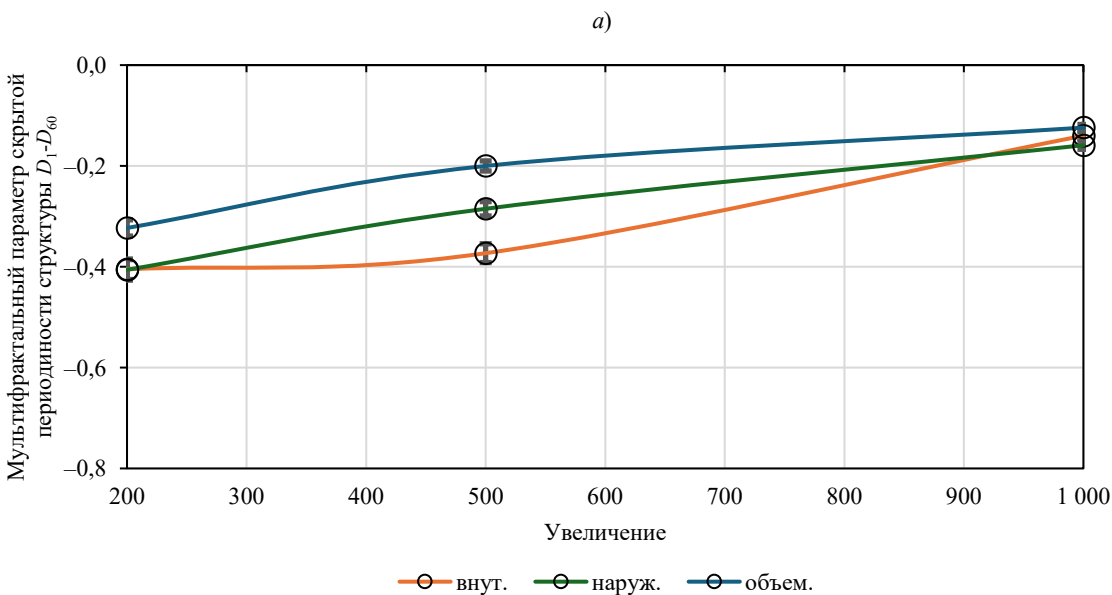
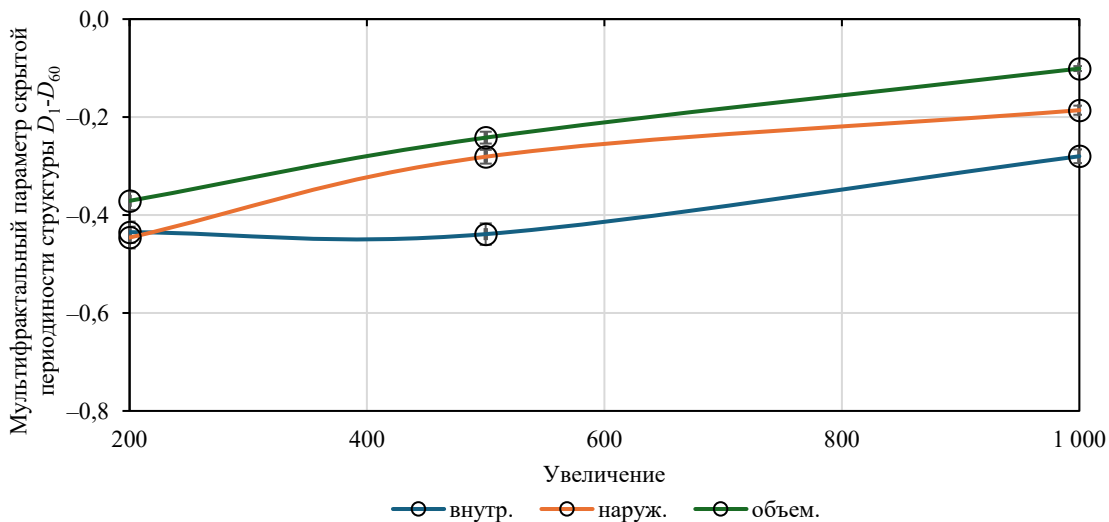
Обсуждение. Полученные результаты подтверждают диагностический потенциал пространственно-локализованных измерений результирующей напряжённости постоянного магнитного поля H_r при циклическом нагружении. Наиболее выраженная магнитная изменчивость наблюдается в интервале $Ni/Np = 0,4-0,5$, а максимальные локальные изменения параметров регистрируются в зоне формирования очага разрушения, что согласуется с ранее показанной чувствительностью магнитных характеристик к накоплению повреждений в модельных элементах металлоконструкций [1].

В диапазоне $Ni/Np = 0,8–0,9$ выявлена фаза относительной стабилизации магнитного отклика (снижение вариативности Hr и/или производных показателей) с последующим переходом к более неустойчивому режиму. Подобная динамика по типу «затишье → резкое изменение» описана для акустических сигналов как диагностический признак предразрушения [15]. Сопоставимые подходы к мониторингу деградации по физическим параметрам в условиях эксплуатации также демонстрируются при ультразвуковом контроле [16].

Интерпретация наблюдаемых магнитных эффектов должна учитывать связь магнитного отклика с дефектной структурой и локальным напряжённым состоянием материала. Взаимодействие доменных стенок с дислокациями и дефектами, показанное в микромагнитном моделировании, является одним из механизмов, способных приводить к локальным изменениям магнитных параметров [2]. Дополнительно информативность магнитных методов, чувствительных к микроструктурным неоднородностям на уровне зёрен и границ, подтверждается исследованиями магнитного шума Баркгаузена с высоким пространственным разрешением [17].

Практическая применимость методики для реальных металлоконструкций определяется требованиями к точности и воспроизводимости измерений и устойчивости результата к действию внешних факторов. К критическим условиям относятся воспроизводимое позиционирование датчика (ориентация и зазор «датчик — поверхность»), повторяемая траектория сканирования и контроль магнитного фона. На результаты могут влиять геометрия объекта (кривизна, изменение толщины, близость сварных швов и вырезов), магнитная предыстория (остаточное намагничивание) и посторонние источники магнитного поля. Существенным фактором интерпретации остаются остаточные напряжения как компонент текущего состояния материала, что подчёркивается в обзорных работах по данной тематике [5].

На рис. 4 приводятся результаты изучения изменения мультифрактальных параметров в соответствии с [13, 14].



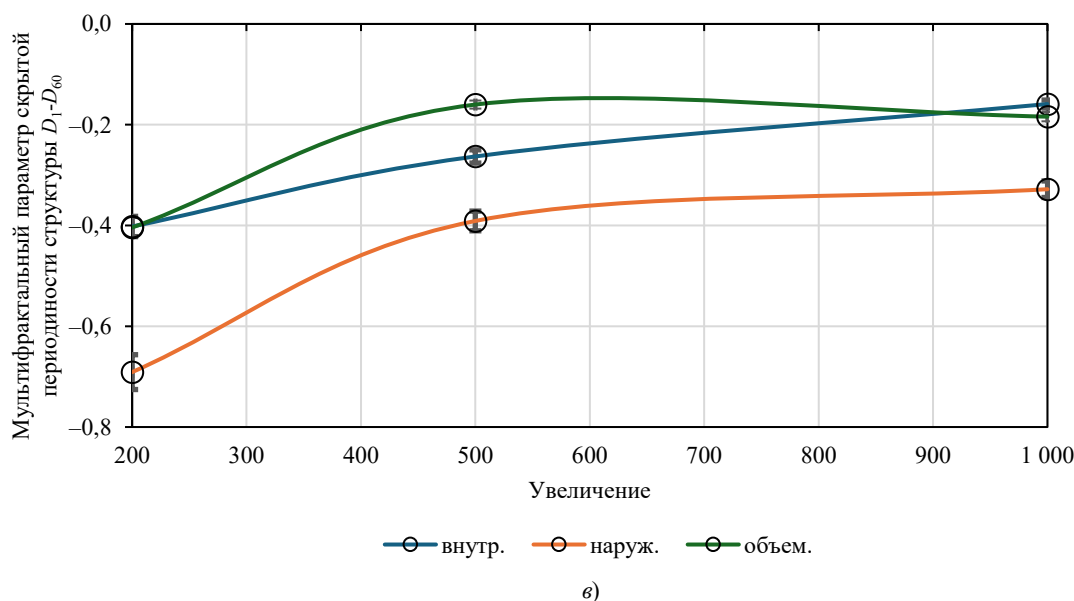


Рис. 4. Изменение мультифрактального параметра скрытой периодичности структуры D_1-D_0 в зависимости от масштаба наблюдения (увеличения микроскопа) для различных зон образца стали 09Г2С: *a* — исходное состояние; *b* — область, отдалённая от зоны разрушения; *в* — зона разрушения

В исходном состоянии (рис. 4 *a*) зависимости параметра D_1-D_0 от увеличения масштаба имеют плавный характер и не демонстрируют резких различий между зонами по толщине образца, что свидетельствует об отсутствии признаков локальной деградации.

В области, отдалённой от зоны разрушения (рис. 4 *b*), зависимости параметра D_1-D_0 сохраняют возрастающий характер, однако различия между зонами по толщине становятся более выраженными. На увеличении $\times 500$ фиксируется максимальное расхождение кривых, что связано с переходом от зеренной к субзеренной организации структуры, наиболее чувствительной к внутренним напряжениям. Внутренняя зона характеризуется пониженным значением параметра D_1-D_0 , что указывает на частичную потерю структурной упорядоченности.

Объёмная часть, напротив, сохраняет высокую скрытую периодичность, что отражает её относительную стабильность. Таким образом, на данном этапе развития повреждений формируется градиент микроструктурной организации от устойчивой (объём) области к неустойчивой, что согласуется с распределением внутренних напряжений в циклически нагруженном образце.

В зоне разрушения (рис. 4 *в*) наблюдается наиболее резкое изменение характера зависимости $D_1-D_0 = f(\text{увеличение})$. Для внутренней поверхности, прилегающей к очагу разрушения, значения параметра становятся минимальными (до $-0,6 \dots -0,7$), что указывает на потерю скрытой периодичности и рост хаотичности распределения структурных элементов.

Сопоставление полученных зависимостей показывает, что по мере перехода от исходного состояния к зоне разрушения происходит устойчивая тенденция к снижению параметра D_1-D_0 , особенно в области, прилегающей к очагу трещины.

Таким образом, мультифрактальный параметр D_1-D_0 , характеризующий скрытую периодичность, может рассматриваться как чувствительный индикатор перехода структуры от стабильного состояния к неустойчивому. Его пространственное распределение коррелирует с зоной магнитных аномалий, выявленных по изменению результирующей напряжённости магнитного поля H_r , что указывает на общую природу микроструктурных и магнитных признаков деградации в исследуемом материале.

Сопоставление зависимостей мультифрактального параметра скрытой периодичности структуры D_1-D_0 для различных стадий состояния материала (рис. 4) показало, что по мере перехода от исходного состояния к зоне разрушения наблюдается устойчивая тенденция к снижению параметра и исчезновению структурной периодичности. В исходном состоянии структура стали 09Г2С сохраняет выраженную масштабную упорядоченность и слабый технологический градиент по толщине. В зоне, отдалённой от очага разрушения, формируется градиент микроструктурной стабильности: внутренние области демонстрируют снижение D_1-D_0 вследствие локальной деформации, тогда как наружные сохраняют регулярность субструктуры. В зоне разрушения происходит полная утрата корреляции между структурными элементами, исчезает скрытая периодичность, а микроструктура приобретает статистически хаотический характер. Таким образом, изменение параметра D_1-D_0 отражает переход материала от состояния структурного равновесия к фазе деградации и может использоваться как чувствительный количественный индикатор степени поврежденности в ферромагнитных сталях.

Сопоставление зависимости степени однородности f_{60} для различных зон по толщине образца (рис. 5) показало, что при переходе от исходного состояния к зоне разрушения наблюдается устойчивая тенденция к снижению параметра и нарушению равномерности распределения структурных элементов. В исходном состоянии структура стали 09Г2С характеризуется высокой однородностью и слабым технологическим градиентом. В зоне, отдалённой от очага разрушения, наблюдается выравнивание значений f_{60} , что свидетельствует о начале дестабилизации структуры и частичном перераспределении внутренних напряжений. В зоне разрушения происходит дальнейшее снижение степени однородности и изменение соотношения между зонами: наружная поверхность сохраняет остаточную упорядоченность, тогда как объёмная часть теряет структурную согласованность. Таким образом, уменьшение f_{60} является количественным показателем роста неравномерности распределения микроструктуры и соответствует фрактальному признаку деградации материала, установленному ранее по параметру D_1-D_0 .

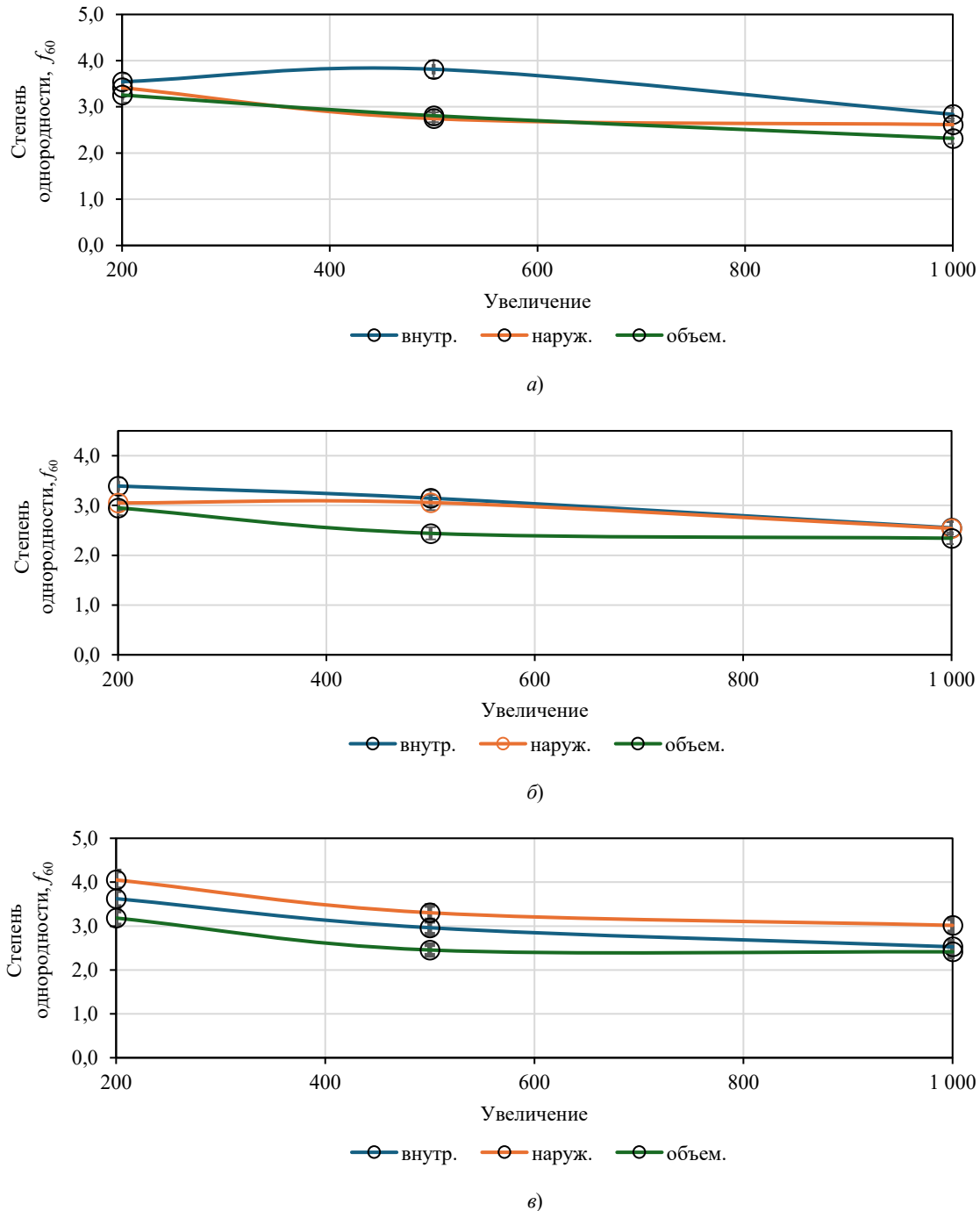


Рис. 5. Изменение мультифрактального параметра степени однородности f_{60} в зависимости от масштаба наблюдения (увеличения микроскопа) для различных зон образца стали 09Г2С: а — исходное состояние; б — область, отдалённая от зоны разрушения; в — зона разрушения

Анализ изменения фрактальной размерности D_0 для различных зон образца показал закономерную эволюцию геометрической сложности микроструктуры по мере перехода от исходного состояния к зоне разрушения (рис. 6).

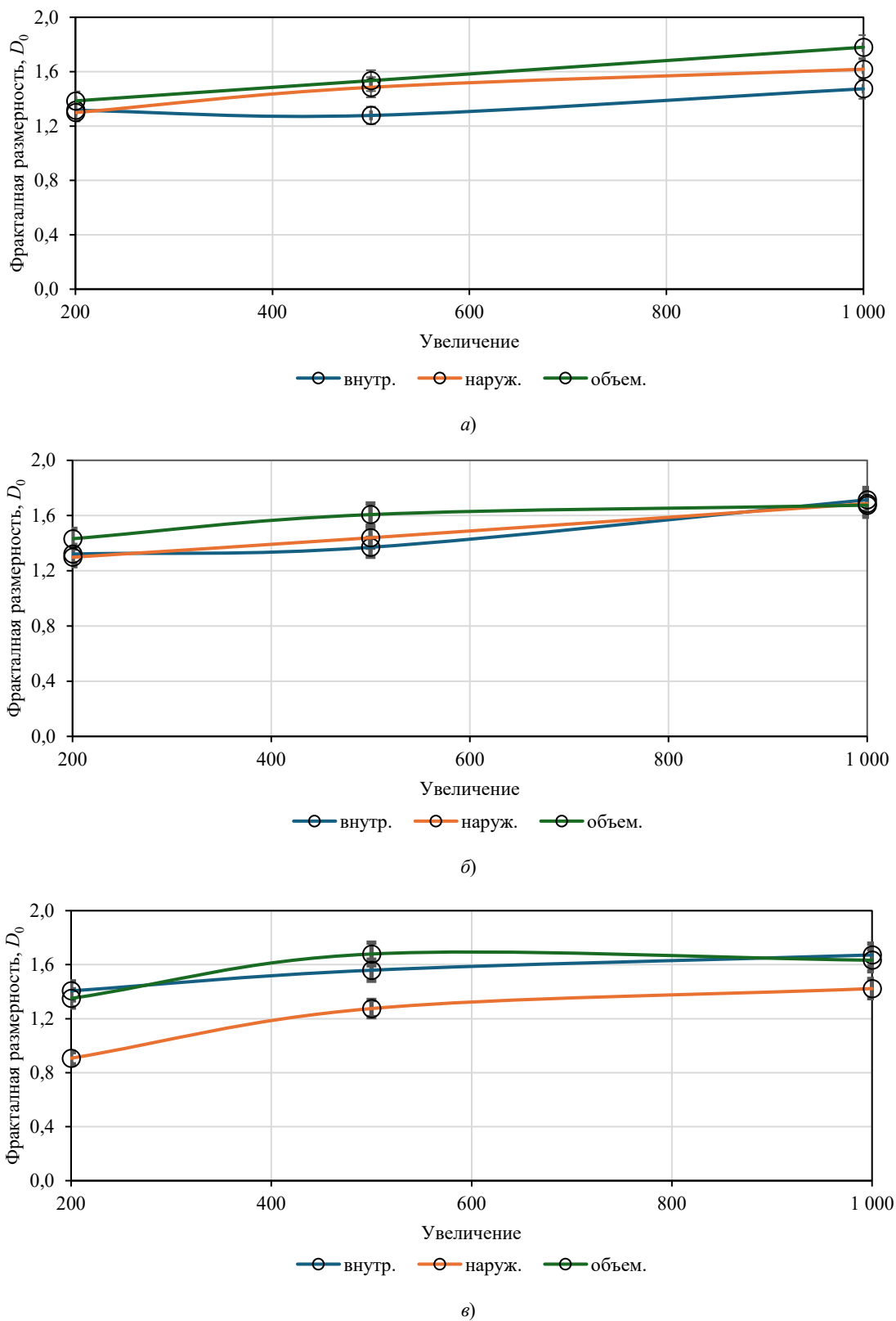


Рис. 6. Изменение фрактальной размерности D_0 в зависимости от масштаба наблюдения (увеличения микроскопа) для различных зон образца стали 09Г2С: а — исходное состояние; б — область, отдалённая от зоны разрушения; в — зона разрушения

Наиболее существенные изменения наблюдаются в зоне разрушения (рис. 6 в). Для наружной поверхности фиксируется наибольшее снижение фрактальной размерности D_0 (до 1,3), в то время как для внутренней и объёмной частей значения остаются выше (1,6–1,7). Это отражает потерю структурной сложности и разрушение самоподобной организации микроструктуры именно в поверхностных слоях.

Таким образом, уменьшение фрактальной размерности D_0 служит индикатором потери структурной сложности и самоорганизации материала, отражая переход от устойчивой конфигурации зеренной и субзеренной структуры к фрагментированной и хаотичной. Минимальные значения D_0 на наружной поверхности соответствуют зонам инициации микротрещин, показанным на рис. 7.

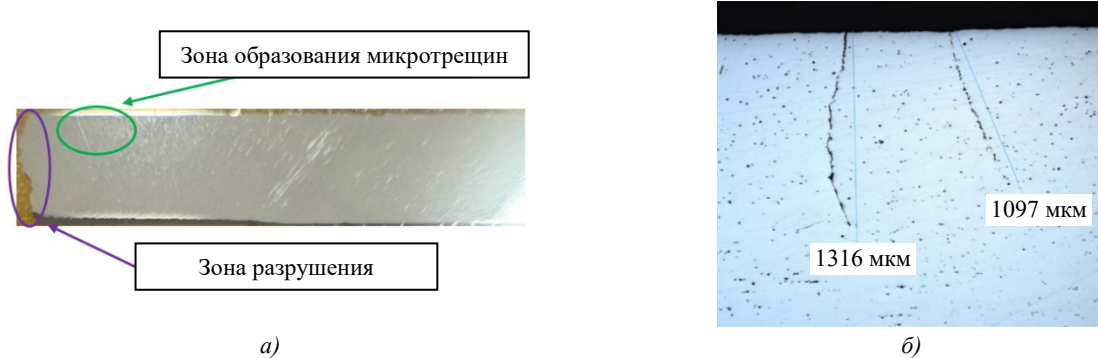


Рис. 7. Макроструктура и микротрещины в поперечном сечении образца из стали 09Г2С вблизи зоны разрушения после циклического изгиба: а — общий вид поперечного сечения с выделением области разрушения и области образования микротрещин; б — микрофотография микротрещин в поперечном сечении с указанием характерной длины 1097 и 1316 мкм ($\times 100$)

Следует отметить, что снижение фрактальной размерности D_0 на наружной поверхности сопровождается аналогичными изменениями других мультифрактальных параметров.

Локальное падение всех трёх параметров (D_0 , D_1-D_0 и f_{60}) согласуется с выявленными при магнитных измерениях аномалиями H_r , что подтверждает общую природу процессов накопления повреждений и инициирования микротрещин.

Для наглядного подтверждения закономерностей, выявленных по мультифрактальным и магнитным параметрам, был проведён анализ микроструктуры образцов в характерных зонах. Представленные на рис. 8 изображения демонстрируют постепенное нарушение упорядоченности структуры — от внутренней части к наружной поверхности, где формируются микротрещины.

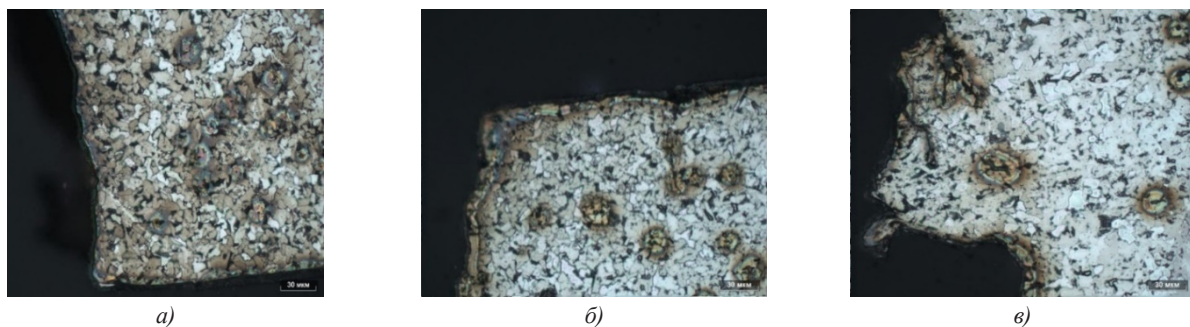


Рис. 8. Микроструктура частей поперечного сечения стенки образца в зоне разрушения: а — наружной; б — центральной; в — внутренней

На микроструктуре наружной поверхности, прилегающей к зоне разрушения, наблюдается высокая степень фрагментации зерен феррита и перлита, а также локальные участки с неравномерным контрастом, свидетельствующие о развитии пластической деформации. Видны начальные микротрещины и субмикроскопические разрывы по границам зёрен, сопровождающиеся потерей чёткости их очертаний и локальной разориентацией субструктурных элементов (рис. 8).

Сравнение микроструктур наружной, центральной и внутренней частей образца в зоне разрушения (рис. 8) показывает выраженный градиент степени деградации структуры по толщине. Внутренняя часть сохраняет упорядоченную феррито-перлитную морфологию, чёткие границы зёрен и равномерное распределение фаз, что соответствует высоким значениям фрактальной размерности D_0 и параметра однородности f_{60} . В центральной зоне наблюдается начальная перестройка зеренно-субзеренной структуры: появляются малоугловые субграницы и локальные контрасты, указывающие на повышение внутренней неустойчивости и снижение параметра D_1-D_0 . Наконец, на наружной поверхности фиксируется максимальная фрагментация и локальное микротрещинообразование, что сопровождается падением всех трёх фрактальных показателей: D_0 , D_1-D_0 и f_{60}

Такое распределение микроструктурных признаков полностью согласуется с результатами мультифрактального анализа и магнитных измерений: наружная часть, где наблюдается наибольшая потеря структурной сложности, совпадает с областью магнитных аномалий H_r и отражает зону максимального накопления повреждений. Таким образом, сопоставление микроструктурных, фрактальных и магнитных данных подтверждает, что деградация материала имеет выраженный градиентный характер — от стабильной внутренней структуры к разрушенной поверхности, где и формируется очаг усталостного разрушения.

Полученный набор магнитных и мультифрактальных признаков рассматривается как основа для последующего построения моделей оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса. Формируемый массив параметров может быть использован в дальнейшем как обучающая база для интеллектуальных систем оценки технического состояния, что открывает возможности к построению более устойчивых и адаптивных методов прогностического мониторинга.

Заключение. Комплексное исследование стали 09Г2С при циклическом изгибе показало единый закономерный характер эволюции магнитных, фрактальных и микроструктурных параметров, отражающих процессы накопления повреждений и разрушения. Магнитные измерения распределения результирующей напряжённости поля H_r выявили локальные аномалии, совпадающие с областями повышенных остаточных напряжений, и локализации деформации вблизи наружной поверхности.

Результаты мультифрактального анализа микрофотографий, выполненного в программе *MFRDrom Fast*, подтвердили связь магнитных аномалий с деградацией микроструктуры. Отмечено последовательное снижение фрактальной размерности D_0 , параметра скрытой периодичности D_1-D_0 и степени однородности f_{60} , что указывает на разрушение самоподобной организации и рост хаотичности субструктуры.

Металлографический анализ выявил чёткий градиент деградации по толщине: внутренняя часть сохраняет стабильную феррито-перлитную структуру, центральная характеризуется частичной фрагментацией, а наружная наиболее разрушена и содержит микротрещины. Сопоставление данных трёх уровней показало согласованное поведение параметров H_r , D_0 , D_1-D_0 и f_{60} , что подтверждает их взаимосвязанную природу.

Таким образом, деградация стали 09Г2С при циклическом изгибе имеет мультиуровневый характер: магнитные изменения отражают накопление дефектов, фрактальные параметры — разрушение масштабной структуры, а микроструктурный анализ — конечную стадию микротрещинообразования. Совокупность этих признаков может быть использована как единый диагностический критерий состояния материала и основа для оценки остаточного ресурса элементов, работающих в условиях переменных нагрузок.

Список литературы / References

1. Кадыров Р.О., Шерматов Д.Н., Гафарова В.А., Кузеев И.Р. Изменение магнитных характеристик в модельном образце уторного узла резервуара от уровня накопленных повреждений. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2025;4:68–79.

Kadyrov RO, Shermatov DN, Gafarova VA, Kuzeev IR. Changes in the Magnetic Characteristics of a Model Specimen of a Tank's Utor Assembly as a Function of Accumulated Damage. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2025;4:68–79. (In Russ.)

2. Kaappa S, Santa-aho S, Honkanen M, Vippola M, Laurson L. Magnetic Domain Walls Interacting with Dislocations in Micromagnetic Simulations. *Communications Materials*. 2024;5:256. <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00697-9>

3. Boyao Lyu, Shihua Zhao, Yibo Zhang, Weiwei Wang, Haifeng Du, Jiadong Zang. MagNet: Machine Learning Enhanced Three-Dimensional Magnetic Reconstruction. *arXiv*. 2022;2210.03066. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.03066>

4. Broadway DA, Flaks M, Dubois AEE, Maletinsky P. Reconstruction of Non-Trivial Magnetization Textures from Magnetic Field Images Using Neural Networks. *Mesoscale and Nanoscale Physics arXiv*. 2024;2412.19381. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.19381>

5. Ali Tabatabaiean, Ahmad Reza Ghasemi, Mahmood M Shokrieh, Bahareh Marzbanrad, Mohammad Baraheni, Mohammad Fotouhi. Residual Stress in Engineering Materials: A Review. *Advanced Engineering Materials*. 2021;23(5):1–65. <https://doi.org/10.1002/adem.202100786>

6. El-Achkar T, Weygand D. Free Surface Acts as Dislocation Sink in Cyclic Loading. In book: *Fatigue of Materials at Very High Numbers of Loading Cycles*. Springer; 2018. P. 395–416.

7. Polák J. Role of Persistent Slip Bands and Persistent Slip Markings in Fatigue Crack Initiation in Polycrystals. *Crystals*. 2023;13(2):220. <https://doi.org/10.3390/cryst13020220>

8. Romanov AE, Kolesnikova AL. Micromechanics of Defects in Functional Materials. *Acta Mechanica*. 2021;232(5):1901–1915. <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02872-8>

9. Gaur V, Doquet V, Persent E, Mareau C, Roguet É, Kittel J. Surface Versus Internal Fatigue Crack Initiation in Steel: Influence of Mean Stress. *International Journal of Fatigue*. 2016;82(3):437–448. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.08.028>
10. Mandelbrot BB. *The Fractal Geometry of Nature*. W.H. Freeman and Company; 2021. 500 p.
11. Fernández R, González-Doncel G, Garcés G. Fractal Analysis of Strain-Induced Microstructures in Metals. In book: *Fractal Analysis – Selected Examples*. IntechOpen; 2020. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91456>
12. Patiño-Ortiz M, Patiño-Ortiz J, Martínez-Cruz MÁ, Esquivel-Patiño FR, Balankin AS. Morphological Features of Mathematical and Real-World Fractals: A Survey. *Fractal and Fractional*. 2024;8(8):440. <https://doi.org/10.3390/fractalfract8080440>
13. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. *Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов*. Ижевск: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика»; 2002. 116 с.
Vstovskii GV, Kolmakov AG, Bunin IZh. *Introduction to Multifractal Parameterization of Material Structures*. Izhevsk: Scientific Publishing Center “Regular and Chaotic Dynamics”; 2002. 116 p. (In Russ.)
14. Встовский Г.В. *Элементы информационной физики*. Москва: МГИУ; 2002. 258 с.
Vstovskii GV. *Elements of Information Physics*. Moscow: MSIU; 2002. 258 p. (In Russ.)
15. Ботвина Л.Р., Петерсен Т.Б., Тютин М.Р. Акустическое затишение как диагностический признак предразрушения. *Доклады Академии наук*. 2018;479(5):514–518. <https://doi.org/10.7868/S0869565218110087>
Botvina LR, Petersen TB, Tyutin MR. The Acoustic Gap as a Diagnostic Sign of Prefracture. *Doklady Physics*. 2018;479(5):514–518. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0869565218110087>
16. Шерматов Д.Н., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р., Рубцов А.В. Изменение скорости распространения ультразвуковых волн в материале змеевика реакционной печи в процессе эксплуатации. *Нефтегазовое дело*. 2019;17(5):81–88. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2019-5-81-88>
Shermatov JN, Naumkin EA, Kuzeev IR, Rubtsov AV. Change of Ultrasonic Waves Speed Spreading in a Material of the Reaction Furnace Coil during Operation Process. *Petroleum Engineering*. 2019;17(5):81–88. (In Russ.) <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2019-5-81-88>
17. Ailin Li, Wenwu Zhong, Cong Yu, Xin Zhang, Tao Li, Zheng Fei. Study on Rock Damage Mechanics in the Sustainable Development of the Red Sandstone Area in China: Taking Zhongjiang County as an Example. *Frontiers in Earth Science*. 2025;12:1484633. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1484633>

Об авторах:

Джамшед Наимджонович Шерматов, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), [ORCID](#), [Scopus](#), [SPIN-код](#), jamshed8808@mail.ru

Александр Олегович Борисов, аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), [ORCID](#), [SPIN-код](#), [ResearcherID](#), wot_bax_bax@mail.ru

Гафарова Виктория Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), [ORCID](#), [SPIN-код](#), [Scopus](#), [ResearcherID](#), gafarova.vika@bk.ru

Кузеев Искандер Рустемович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета (450064, Российская Федерация, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1), [ORCID](#), kuzeev2002@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Д.Н. Шерматов: разработка методологии, визуализация, проведение исследований, анализ полученных результатов.

А.О. Борисов: проведение исследований, формальный анализ.

В.А. Гафарова: проведение исследований, написание черновика рукописи, администрирование.

И.Р. Кузеев: научное руководство, анализ полученных результатов, рецензирование и редактирование рукописи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Dzhamshed N. Shermatov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Machines and Equipment, Ufa State Petroleum Technical University (1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation), [ORCID](#), [Scopus](#), [SPIN-code](#), jamshed8808@mail.ru

Alexander O. Borisov, Postgraduate Student of the Department of Technological Machines and Equipment, Ufa State Petroleum Technical University (1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [ResearcherID](#), wot_bax_bax@mail.ru

Victoria A. Gafarova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Technological Machines and Equipment, Ufa State Petroleum Technical University (1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation), [ORCID](#), [SPIN-code](#), [Scopus](#), [ResearcherID](#), gafarova.vika@bk.ru

Iskander R. Kuzeev, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technological Machines and Equipment, Ufa State Petroleum Technical University (1, Kosmonavtov St., Ufa, 450064, Russian Federation), [ORCID](#), kuzeev2002@mail.ru

Claimed Contributorship:

DN Shermatov: methodology, visualization, research, results analysis.

AO Borisov: investigation, formal analysis.

VA Gafarova: investigation, writing – original draft, administration.

IR Kuzeev: supervision, results analysis, writing – review & editing.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 08.12.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 15.01.2026

Принята к публикации / Accepted 27.01.2026

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 331.452

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-61-72>

Методология применения барьерно-ориентированного подхода для оценки рисков травмирования персонала на основе модели Хаддона

В.А. Гарт

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
г. Москва, Российская Федерация

✉ gart_v@mail.ru

EDN: XUJVSZ

Аннотация

Введение. Модернизация производств с ростом автоматизации и усложнением технологических процессов повышает психофизиологическую нагрузку на работников и вероятность ошибок, что усиливает риск производственного травматизма. Наблюдаемый рост числа пострадавших на рабочих местах подчеркивает экономическую и социальную значимость предотвращения несчастных случаев: травматизм снижает производительность и увеличивает расходы на компенсации. Современные подходы управления профессиональными рисками требуют системной оценки не только вероятности инцидента и тяжести последствий, но и состояния защитных механизмов — барьеров безопасности, ограничивающих воздействие опасных факторов. Методология Хаддона, изначально разработанная для транспортной безопасности, показала свою способность выявлять слабые звенья и анализировать последовательность развития инцидентов; её барьерно-ориентированные принципы теоретически применимы в промышленной среде. Однако существующие исследования барьерных моделей в промышленности фрагментарны и не дают универсального инструмента для количественной оценки эффективности барьеров и их вклада в снижение рисков травмирования. В связи с этим цель настоящего исследования — разработать методику применения барьерно-ориентированного подхода на основе модели Хаддона для комплексной количественной оценки рисков травмирования персонала.

Материалы и методы. Для решения задачи снижения производственного травматизма была использована барьерная модель обеспечения безопасности. Исследование включало три части. Первая — комплексный анализ требований российского законодательства в сфере оценки профессиональных рисков, а также научных публикаций, посвящённых применению барьерно-ориентированного подхода. Вторая — описание методологии определения вероятности реализации опасности на основе результатов оценки показателей надежности барьеров безопасности. Оценка барьеров безопасности выполнялась по чек-листам с использованием адаптированной модели Хаддона. Третья — иллюстрация практического применения барьерного подхода на модельном примере.

Результаты исследования. Разработана методология применения барьерно-ориентированного подхода для оценки рисков травмирования. Определён способ количественной оценки влияния актуальных опасностей с учётом показателей надежности барьеров безопасности. Сформированы уровни риска реализации опасности. Отражены как предлагаемые в рамках данного исследования, так и уже применяемые методологические принципы с указанием их преимуществ и ограничений. Приведён пример расчёта вероятности реализации опасности, возникающих при подъёме и перемещении грузов с использованием подъемных сооружений.

Обсуждение. Представленная методология применения барьерно-ориентированного подхода позволяет учитывать влияние организационных факторов и человеческого фактора на безопасность производственных процессов и получать количественные оценки возможности реализации опасности. Кроме того, подход обеспечивает комплексную оценку барьеров безопасности, учитывающую не только их наличие и результативность, но и показатели надежности — эффективность и устойчивость функционирования. Это создаёт основу для упрощения процедуры определения приоритетности реализации мероприятий по профилактике травматизма и оптимизации системы управления профессиональными рисками.

Заключение. Основными результатами проведённого исследования являются: обоснованный способ расчёта вероятности реализации опасных производственных факторов и рекомендации по поэтапному внедрению разработанной методологии в практику управления охраной труда. Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции предложенного подхода с инструментами оперативного мониторинга в области охраны труда и в его применимости для решения задач, связанных с управлением риском травмирования работников в различных производственных условиях.

Ключевые слова: опасный производственный фактор, риск травмирования, барьер безопасности, оценка рисков, производственный травматизм

Благодарности. Автор благодарит руководителя научного проекта Е.П. Потоцкого, рецензента и редакционную команду журнала за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи.

Для цитирования. Гарт В.А. Методология применения барьерно-ориентированного подхода для оценки рисков травмирования персонала на основе модели Хаддона. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2026;10(1):61–72. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-61-72>

Original Empirical Research

Methodology for Implementing a Barrier-Oriented Approach to Risk Assessment of Personnel Injuries Based on the Haddon Model

Victoria A. Gart 

National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

✉ gart_v@mail.ru

Abstract

Introduction. Modernization of production facilities, with increased automation and complexity of technological processes, leads to a greater psychophysiological burden on workers and a higher likelihood of errors. This, in turn, increases the risk of occupational injuries. The increasing number of workplace accidents underscores the economic and social importance of accident prevention, as injuries reduce productivity and increase compensation costs. Modern approaches to occupational risk management require a systematic assessment of not only the probability of an incident and the severity of its consequences, but also the state of protective mechanisms — safety barriers that limit the impact of hazardous factors. Haddon's methodology, originally developed for transportation safety, can be used to identify weak links and analyze the sequence of incidents. Its barrier-oriented principles are theoretically applicable to industrial environments. However, existing research on barrier models in industry is fragmented and does not provide a unified tool for quantifying the effectiveness of barriers and their contribution to reducing injury risks. Therefore, the aim of this study is to develop a method for applying a barrier-oriented approach based on the Haddon model for a comprehensive quantitative assessment of personnel injury risks.

Materials and Methods. A barrier safety model was used to solve the problem of reducing occupational injuries. The study consisted of three parts. The first was a comprehensive analysis of the requirements of Russian legislation in the field of occupational risk assessment, as well as scientific publications on the use of a barrier-oriented approach. The second was the description of the methodology for determining the likelihood of a hazard based on the results of an assessment of the reliability of safety barriers. The assessment of safety barriers was conducted according to checklists using the adapted Haddon model. Finally, an illustration of practical application of barrier approach using model example was provided.

Results. A methodology for using a barrier-oriented approach to assess injury risks has been developed. A method for quantifying the impact of current hazards has been defined, taking into account the reliability of safety barriers. Risk levels for the hazard realization have been determined. Both the methodological principles proposed in this study and those already applied have been considered, indicating their advantages and limitations. An example of calculating the probability of hazards occurring when lifting and moving goods using hoisting devices has been given.

Discussion. The presented methodology for applying the barrier-oriented approach allows us to take into account the influence of organizational factors and human factor on the safety of production processes and to obtain quantitative estimates of the possibility of hazard occurrence. Additionally, this approach provides a comprehensive assessment of safety barriers, considering not only their presence and effectiveness, but also reliability indicators — efficiency and sustainability of operation. This creates a basis for simplifying the process of prioritizing injury prevention measures and optimizing occupational risk management systems.

Conclusion. The main results of the research include a practical way to calculate the probability of hazardous production factors, as well as recommendations for gradual implementation of the developed methodology into the practice of occupational safety and health management. The practical significance of this work lies in its potential for integration of the proposed approach with operational monitoring tools in the field of occupational safety and health and in its applicability to solving problems related to worker injury risk management in various production conditions.

Keywords: hazardous production factor, risk of injury, safety barrier, risk assessment, industrial injuries

Acknowledgements. The author would like to thank the Head of the research project, E.P. Pototskii, the reviewer, and the Editorial team of the journal for their competent expertise and valuable recommendations for improving the article.

For Citation. Gart VA. Methodology for Implementing a Barrier-Oriented Approach to Risk Assessment of Personnel Injuries Based on the Haddon Model. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2026;10(1):61–72. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2026-10-1-61-72>

Введение. В настоящее время одной из наиболее актуальных задач промышленности является модернизация производств за счёт внедрения современного оборудования и передовых технологий. Однако рост уровня автоматизации и усложнение технологических процессов отрицательно сказываются на безопасности труда персонала, сопровождаясь увеличением числа ошибок работников на фоне возрастания напряжения психофизиологических функций.

Указанные негативные тенденции подтверждаются статистическими данными. Согласно [1], по сведениям Международной организации труда (МОТ), ежегодно во всём мире регистрируется примерно 340 млн. несчастных случаев на производстве, при этом около 2,3 млн. работников погибают в результате производственных травм. Согласно [1], в 2022 году в США было зафиксировано 2,8 млн. несчастных случаев на производстве, а за 2021 год зарегистрировано 5,19 тыс. смертельных исходов. Согласно [1], в Великобритании в 2022–2023 годах 561 тыс. работников получили травмы на рабочих местах. Согласно аналитическому обзору ФГБУ «ВНИИ труда» Минтруда России «Анализ производственного травматизма»¹, в Российской Федерации в 2024 году 21,4 тыс. сотрудников получили травмы на производстве, из них 1,04 тыс. случаев сопровождались смертельным исходом. При этом с 2021 года численность пострадавших на рабочих местах увеличилась на 1,1 тыс. человек.

Анализ статистических данных демонстрирует устойчивое сохранение высокого уровня производственного травматизма в различных странах. Это обстоятельство определяет возрастающую значимость вопросов охраны труда на промышленных предприятиях в условиях ускоренного технологического развития. Современные мировые тренды в области снижения производственного травматизма охватывают следующие направления: цифровизацию процессов охраны труда; использование искусственного интеллекта для мониторинга условий труда и состояния работников; внедрение «умных» средств индивидуальной защиты; применение виртуальной реальности (VR) и дополненной реальности (AR) для обучения сотрудников безопасным методам работы; формирование устойчивой культуры безопасности; переход от традиционного, преимущественно реактивного подхода, основанного на анализе несчастных случаев постфактум, к проактивному управлению профессиональными рисками.

Необходимость внедрения проактивного управления рисками подтверждается письмом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 14.07.2025 г. № 15-3/10/В-11850 «О росте производственного травматизма»². В документе указано, что основными причинами несчастных случаев на производстве являются: неудовлетворительная организация производства работ, нарушение правил дорожного движения, отклонения от установленного технологического процесса, а также несоблюдение работниками трудового распорядка и дисциплины труда. Также указано, что среди несчастных случаев с тяжёлыми последствиями, произошедших в Российской Федерации в 2024 году по причине неудовлетворительной организации производства работ, преобладали события, обусловленные отсутствием должного контроля со стороны руководителей и специалистов подразделений за ходом выполнения работ и соблюдением трудовой дисциплины. Совокупность организационных факторов и особенностей человеческого поведения в структуре травматизма указывает на системные недостатки в обеспечении безопасности труда. Эти недостатки можно устранить посредством внедрения эффективных мероприятий по управлению профессиональными рисками на рабочих местах, включая выявление опасностей, оценку уровней рисков и реализацию мер по их снижению с целью минимизации вероятности травмирования персонала.

С учётом изложенного задача оценки и снижения уровней рисков травмирования работников представляет собой актуальное научное направление исследования.

¹ *Анализ производственного травматизма в России:* Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт труда» Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации. Отчет 2025 года.

² *О росте производственного травматизма:* письмо Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 14.07.2025 г. № 15-3/10/В-11850

Одним из ключевых документов, регламентирующих подходы к оценке рисков, является международный стандарт ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010 «Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Методы оценки риска». ³ Данный стандарт описывает широкий спектр методов оценки рисков, каждый из которых обладает собственной областью применения и спецификой практической реализации. Некоторые из указанных методов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Обзор методов оценки профессиональных рисков

№	Название метода	Описание	Преимущества	Недостатки
1	Метод Делфи	Метод обобщения мнений экспертов на основе анонимного опроса и многократного итерационного процесса согласования мнений	Подходит для решения сложных вопросов, где нет однозначных научных подходов или имеется недостаточная статистика. Большая вероятность получения объективной оценки	Длительность процедуры: проведение множества циклов опроса занимает значительное количество времени. Высокая зависимость результатов от компетентности экспертов
2	Контрольные листы	Форма выявления и анализа потенциальных профессиональных рисков путем составления перечня вопросов и критериев проверки	Простота реализации и доступность понимания сотрудниками разных уровней квалификации. Удобство использования в качестве инструмента первичного контроля	Трудоемкость разработки качественных и полных контрольных списков, особенно для крупных предприятий с разнообразием рабочих процессов
3	Анализ дерева событий	Оценка возникновения нежелательных последствий путем пошагового рассмотрения последовательности возможных исходов каждого события	Наглядность, возможность детального учета множества факторов и условий, влияющих на развитие ситуации	Зависимость от качества данных, ограниченность вероятностных оценок (предполагает наличие статистической базы для расчета вероятностей)
4	Анализ видов и последствий отказов (FMEA)	Используется для выявления потенциальных неисправностей системы, анализа возможных причин возникновения дефектов	Повышение надежности оборудования и техники благодаря выявлению критичных узлов и компонентов	Требуются значительные временные ресурсы и усилия квалифицированных специалистов для детального анализа
5	Исследование опасности и работоспособности (HAZOP)	Детальное изучение технологического процесса группой экспертов. Анализ проводится последовательно по каждому элементу системы, оценивая возможные отклонения от нормального режима работы	Четкая процедура анализа позволяет выявить скрытые угрозы, рассматривает широкий спектр возможных отклонений и последствий.	Трудоемкость, метод трудно применять для крупных сложных объектов без упрощений
6	Метод Байеса	Используется для оценки вероятности наступления нежелательных событий на основании имеющейся априорной информации и новых поступающих данных	Снижение степени субъективности оценки. Возможность оперативно реагировать на новые данные и улучшать точность прогнозирования	Зависимость от качества априорных данных. Сложно точно определить вероятность редких событий

³ Национальный стандарт Российской Федерации. Менеджмент риска. Методы оценки риска: ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 сентября 2021 г. №1011-ст.

Существующий инструментарий по оценке профессиональных рисков в основном ограничен традиционным подходом, основанным на анализе вероятности происшествий и тяжести его последствий. При этом уровень безопасности производства определяется степенью ограничения воздействия опасных производственных факторов на работников путём последовательного размещения «барьеров» между источником потенциальной опасности и объектом, находящимся под угрозой. Поэтому при оценке рисков травмирования важно учитывать состояние «барьеров», минимизирующих воздействие опасных производственных факторов. Оценка риска травмирования должна проводиться в источнике его формирования на конкретном рабочем месте с учётом взаимодействия работника с конкретной опасностью и состояния защитных механизмов.

Методология Хаддона [2], разработанная в сфере транспортной безопасности, успешно применяется для выявления слабых звеньев системы безопасности. Применение аналогичного подхода в промышленной среде представляется перспективным направлением развития практики оценки рисков травмирования. Вместе с тем, имеющиеся публикации по барьерным моделям безопасности ограничиваются отдельными примерами реализации — они не предлагают универсального метода количественного анализа эффективности барьеров применительно к промышленному производству. Следовательно, существующая практика оценки профессиональных рисков требует разработки нового инструмента, позволяющего комплексно оценить эффективность барьеров безопасности и оптимизировать управление ими. Исходя из этого, целью настоящего исследования является разработка методологии применения барьерно-ориентированного подхода на основе модели Хаддона в оценке рисков травмирования персонала.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- проанализированы современные методы оценки профессиональных рисков, определены ограничения по их применению;
- предложен способ расчёта вероятности реализации опасных производственных факторов, основанный на оценке надёжности барьеров безопасности, определённых в соответствии с моделью Хаддона;
- проведена оценка вероятности реализации опасности, связанной с подъёмом и перемещением грузов подъёмными сооружениями.

Обзор существующих методов барьерных моделей. В русскоязычных источниках одно из первых упоминаний о барьерах безопасности встречается в материале российско-норвежского проекта «Баренц-2020»⁴. В рамках этого проекта основная задача состояла в оценке влияния арктических условий на работоспособность защитных барьеров. Появление и развитие концепции барьеров было вызвано потребностью в оценке эффективности технических и организационных средств защиты, применяемых на объекте [3, 4].

В настоящее время российская практика нормативно-правового регулирования в области оценки профессиональных рисков включает рекомендации по использованию барьерной модели безопасности. Так, в «Рекомендациях по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков»⁵, утверждённых приказом Министерства труда и социальной защиты РФ от 28.12.2021 г. № 926, приведены следующие подходы:

1. Метод «галстук-бабочка» (Bow-Tie), описанный в работах [5, 6], позволяет оценивать полноту системы защиты анализируемого объекта. Его преимущество — наглядная визуализация взаимосвязей между потенциальными источниками опасности и негативными последствиями через центральную точку («нежелательное событие»). Метод получил широкое распространение благодаря ясности представления и универсальности. Вместе с тем он не всегда обеспечивает получение количественных оценок, необходимых для приоритизации профилактических мероприятий.

2. Метод анализа уровней защиты (Layer of Protection Analysis), рассмотренный в работах [7, 8], представляет собой количественную оценку надёжности защитных барьеров на основе вероятностных характеристик их отказов. Этот метод рекомендован при обосновании необходимости установки новых барьеров или модернизации существующих.

Описанные подходы составляют методологическую основу концепции барьерной защиты, направленную на снижение риска травмирования. Однако они имеют ряд ограничений, снижающих эффективность применения в производственной практике:

- ориентированы на локальные объекты и отдельные опасные ситуации, что приводит к фрагментарности анализа и не позволяет выявлять взаимосвязи между элементами системы безопасности;
- опираются на статистические данные о вероятности возникновения негативного события и эффективности действующих барьеров — эти предположения могут оказаться неверными при изменении условий эксплуатации оборудования, что требует регулярного обновления исходных данных и корректировки расчётных моделей и усложняет управление рисками;
- недостаточно учитывают влияние организационных факторов и человеческого фактора на безопасность производства.

⁴ Оценка международных стандартов для безопасной разведки, добычи и транспортировки нефти и газа в Баренцевом море: Отчет проекта «Баренц-2020».

⁵ Рекомендации по выбору методов оценки уровней профессиональных рисков и по снижению уровней таких рисков: Приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 28.12.2021 г. № 926.

Идея учёта надёжности барьеров при оценке рисков травмирования, развиваемая в российских исследованиях [9, 10], частично снимает перечисленные ограничения, однако остаётся открытым вопрос о необходимости дополнительного учёта следующих критериев:

- динамики состояния барьеров, подверженных естественному износу (технические барьеры) и изменению требований (процедурные и поведенческие барьеры);
- человеческого фактора как показателя корректности взаимодействия персонала с оборудованием и средствами защиты.

Таким образом, несмотря на достоинства, рассмотренные методы обладают недостатками, препятствующими их полноценному внедрению в практику управления рисками травмирования. Требуется разработка комплексной методологии, объединяющей достоинства количественного анализа с адаптивностью к меняющимся условиям эксплуатации и способностью учитывать как инженерные, так и организационно-психологические аспекты функционирования системы безопасности. Формирование таких методик создаст надёжную основу для эффективного управления рисками.

Материалы и методы. В основе предлагаемой методологии лежит единый механизм возникновения несчастного случая на производстве: пострадавший в конкретной производственной локации вступает в контакт с объектом (оборудование, инструмент, материалы), обладающим достаточным количеством энергии, что и придаёт этому объекту опасные для человека свойства [11, 12]. Учитывая, что спусковым механизмом несчастного случая в 80–90 % опасных ситуаций выступают активные (преднамеренные либо ошибочные) действия самих пострадавших [13, 14], а также руководствуясь статьей 209 ТК РФ⁶, предлагается определять персональный уровень риска травмирования в источнике его формирования (конкретной локации) с учетом действующих в ней опасностей и влияния человеческого фактора следующим образом:

$$R = \sum P_j \cdot W \cdot F_j, \quad (1)$$

где P_j — вероятность реализации j -го опасного производственного фактора; W — склонность работника к риску травмирования; F_j — тяжесть негативных последствий при воздействии j -го опасного производственного фактора.

Оценка вероятности реализации j -го опасного производственного фактора проводилась на примере оперативного персонала предприятия металлургической отрасли по следующему алгоритму. На первом этапе выполнялась идентификация опасных производственных факторов, воздействующих на работника в процессе выполнения трудовых операций. Источниками информации для идентификации служили:

- обследование рабочего места;
- наблюдение за проведением работ;
- опрос персонала;
- анализ нормативно-правовых актов;
- анализ локальных нормативно-правовых актов предприятия.

Идентификация осуществлялась по всем объектам исследования — видам работ, местам проведения работ, нештатным и аварийным ситуациям.

На втором этапе для каждого идентифицированного фактора с потенциалом несчастного случая был разработан электронный чек-лист по проверке функционирования барьеров безопасности (таблица 4) с использованием on-line сервиса MSForms. Графа 2 чек-листа сформирована в соответствии с моделью Хаддона и обладает универсальным характером для всех опасных производственных факторов, независимо от специфики производства. Графа 3 чек-листа содержит наиболее критичные требования безопасности, предусмотренные нормативно-правовыми актами и локальными актами производственного объекта (стандарты, положения, инструкции по охране труда, технологические инструкции), которые способны препятствовать передаче энергии от источника (оборудования) к человеку — невыполнение этих требований может привести к несчастному случаю на производстве. Для внедрения риск-ориентированного подхода подбор таких критичных требований выполнялся с их адаптацией к особенностям конкретного производственного объекта с учётом конструктивных характеристик оборудования и эксплуатационных условий с применением метода «галстук-бабочка» (рис. 1). В графе 4 чек-листа фиксируется результативность барьеров безопасности, определённая в соответствии с [15].

⁶ Трудовой кодекс Российской Федерации: Федеральный закон № 197-ФЗ от 30.12.2001г.

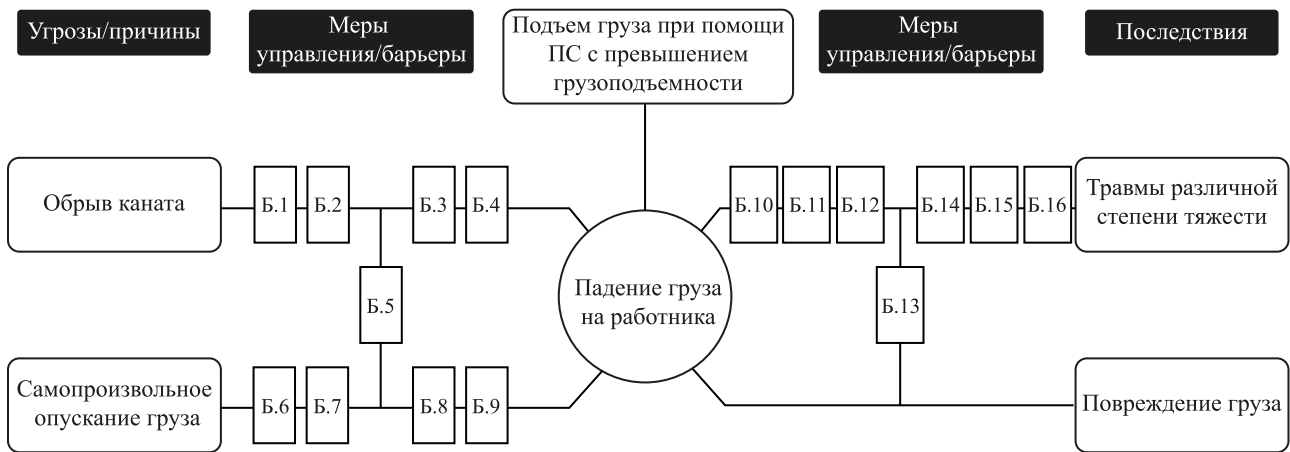


Рис. 1. Анализ риска методом «галстук–бабочка»: Б1 — оценка состояния каната машинистом крана перед началом работы; Б2 — инструментальный контроль износа каната; Б3 — ограничитель грузоподъемности; Б4 — конечный выключатель переподъема; Б5 — отсутствие людей в опасной зоне; Б6 — оценка износа колодок тормоза главного подъема; Б7 — проверка нулевой блокировки; Б8 — подъем груза на безопасную высоту; Б9 — регламентное обслуживание ПС; Б10 — защитные ограждения опасных участков; Б11 — предупредительный сигнал; Б12 — применение СИЗ; Б13 — навыки действий в аварийных ситуациях; Б14 — обучение по оказанию первой помощи; Б15 — оперативная связь с медицинской службой; Б16 — аптечка первой помощи

На третьем этапе выполняли оценку функционирования барьеров безопасности руководителями производственных участков по чек-листу в рамках мониторинга состояния охраны труда с использованием QR-кодов, размещённых в локалях риска, в соответствии со шкалой, представленной в таблице 2. Результаты производственного контроля исправности барьеров безопасности фиксировали в электронной системе MCForms (графа 5 чек-листа). В качестве модельного примера рассматривалась ситуация, при которой ответственный за содержание подъемного сооружения в работоспособном состоянии в ходе периодических осмотров в установленные графиком сроки совместно с оператором ПС проводит оценку приборов безопасности. Значение «0» по показателю эффективности ставилось при отсутствии или неисправности прибора, значение «1» — при наличии технических замечаний без ограничения работоспособности (например, ограничитель подъёма крюка ПС срабатывает, когда расстояние между крюком и лебёдкой составляет 100 мм при норме 200 мм и более). Значение «3» присваивалось при полной технической исправности в соответствии с паспортом прибора. При этом при расчёте вероятности реализации опасности по формуле (2) использовали не конкретную экспертную оценку, а обобщённую оценку, основанную на максимально возможном количестве баллов.

На четвёртом этапе проводили математическую обработку результатов оценки вероятности реализации опасности и относили полученные значения к уровням реализации опасных производственных факторов с помощью Excel.

Результаты исследования. Показатель вероятности реализации идентифицированных опасных производственных факторов (P_j) из формулы (1) предлагается оценивать с учетом критериев динамического состояния барьеров безопасности следующим образом:

$$P_j = \prod_{i=1}^n (1 - E_i \cdot N_i \cdot S_i), \quad (2)$$

где E_i , N_i , S_i — результативность, эффективность и устойчивость i -го барьера безопасности соответственно ($i = 1, 2, \dots, n$) в процессе его эксплуатации.

Результативность (E_i), отражающая значимость барьера в системе обеспечения безопасности производственного объекта, определялась согласно ГОСТ 12.0.011-2017 «Методы оценки и расчета профессиональных рисков работников железнодорожного транспорта», утвержденного приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 декабря 2017 г. № 2065-ст⁷.

Оценка эффективности барьера безопасности (N_i), являющаяся фактором исправности, оценивалась по критериям в соответствии со шкалой и представлена в таблице 2.

⁷Методы оценки и расчета профессиональных рисков работников железнодорожного транспорта: ГОСТ 12.0.011-2017. Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 декабря 2017 г. № 2065-ст.

Таблица 2

Критерии эффективности барьеров безопасности

Уровень	Описание состояния	Значение
Удовлетворительный	Состояние соответствует заданному уровню	3
Приемлемый	Состояние не в полной мере соответствует заданному уровню	1
Критический	Барьер безопасности не функционирует	0

Устойчивость (S_i), характеризующая частоту выявляемых несоответствий в функционировании барьеров безопасности, рассчитывалась по формуле:

$$S_i = e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

где $\lambda = b/B$ — коэффициент частоты несоответствий, b — общее количество несоответствий, B — количество проверок исправности (для технического барьера)/количество проверок функционирования (для организационного барьера), t — анализируемый период ($t = 1$, если анализируемый период составляет 1 год).

Определение приоритетности реализации мероприятий по охране труда производилось в зависимости от расчетного уровня риска реализации опасности (таблица 3).

Таблица 3

Уровень реализации опасных производственных факторов

Вероятность реализации опасности	Категория риска травмирования	Срочность мероприятий
0	Риск отсутствует	Мероприятия не требуются
<0,24	Умеренный	Требуются мероприятия со сроками устранения
0,25–0,49	Существенный	Требуются неотложные мероприятия
0,5–1,0	Высокий	Требуется остановка работ до реализации мероприятий

В качестве примера применения предложенного методологического подхода выполнена оценка вероятности реализации опасных ситуаций, связанных с подъёмом и перемещением грузов с использованием подъёмных сооружений. Оценка проведена для оператора подъёмных сооружений металлургического предприятия, выполняющего строповку и обвязку грузов перед их последующим перемещением мостовым краном (далее — оператор ПС). Для анализа указанного опасного производственного фактора был разработан чек-лист, фрагмент которого представлен в таблице 4.

Таблица 4

Фрагмент чек-листа по проверке функционирования барьеров безопасности по опасностям, связанным с подъемом и перемещением грузов с помощью подъемных сооружений

№	Функция группы барьеров безопасности	Объект проверки	Результативность (E_i)	Эффективность (N_i)	Устойчивость (S_i)
1	2	3	4	5	6
1.	Предотвращение выделения энергии	1.1 Состояние металлоконструкций и оснастки	0,9	3	1
2.	Блокировка распространения энергии	2.1 Прибор, ограничивающий подъем грузозахватного органа выше максимально допустимого уровня	0,8	2	0,51
		2.2 Аварийный выключатель для обесточивания ПС в экстренных ситуациях	0,8	3	0,71

3.	Установка защитных конструкций	3.1 Ограждения, другие системы контроля, исключая внезапный вход, проникновение в опасную зону	0,7	1	0,36
4.	Предупреждение об опасности	4.1 Звуковой сигнал	0,6	1	0,71
		4.2 Прибор, сигнализирующий о превышении грузоподъемности...	0,6	3	1
5.	Описание процедур обращения с опасностью	5.1 Приемы работы для машинистов кранов и стропальщиков	0,5	0	0,51
		5.2 Выполнение графика ТО и ППР ПС	0,5	3	1
6.	Готовность к выполнению должностных обязанностей (обучение, медицинский осмотр)	6.1 Машинисты кранов и стропальщики обучены, успешно прошли стажировку и проверку знаний	0,2	0	0,51
		6.2 Отсутствуют противопоказания по состоянию здоровья	0,2	3	1
7.	Обеспечение СИЗ	Комплект спецодежды	0,1	1	0,71

В графе 6 чек-листа указывается устойчивость барьеров безопасности (S_i), формируемая автоматически на основании результатов проводимых оценок барьеров безопасности в течение календарного года. Например, в течение года было проведено 3 проверки исправности барьера 3.1 модельного примера, приведенного в таблице 4. В ходе 2-х проверок были отмечены замечания по его исправности. Таким образом, коэффициент устойчивости (S_i), рассчитываемый по формуле (3), будет равен:

$$S_i = e^{-0,67 \cdot 1} = 0,51.$$

Вероятность реализации опасностей, связанных с подъемом и перемещением грузов с помощью подъемных сооружений, рассчитанная по формуле (2), в рассматриваемом примере составляет:

$$P_{ПС} = (1 - 0,9 \cdot 1 \cdot 1) \cdot (1 - 0,8 \cdot 0,7 \cdot 0,51) \cdot (1 - 0,8 \cdot 1 \cdot 0,71) \cdot (1 - 0,7 \cdot 1 \cdot 0,36) \cdot (1 - 0,6 \cdot 0,3 \cdot 0,71) \cdot (1 - 0,6 \cdot 1 \cdot 1) \cdot (1 - 0,5 \cdot 0 \cdot 0,51) \cdot (1 - 0,5 \cdot 1 \cdot 1) \cdot (1 - 0,2 \cdot 0 \cdot 0,51) \cdot (1 - 0,2 \cdot 1 \cdot 1) \cdot (1 - 0,1 \cdot 0,3 \cdot 0,71) = 0,025.$$

Согласно таблице 3, это соответствует умеренному риску травмирования, для снижения которого требуется плановая разработка мероприятий со сроками устранения.

Обсуждение. Предлагаемый барьерно-ориентированный подход к оценке профессиональных рисков принципиально отличается от традиционных методов, которые ориентированы преимущественно на частоту и тяжесть происшествий. Главное преимущество нового метода — оценка результативности, эффективности и устойчивости барьеров безопасности на рабочих местах. Применение барьерной модели, основанной на концепции Хаддона, предполагает создание многоуровневой системы защиты, каждый уровень которой нацелен на снижение вероятности реализации воздействия опасного производственного фактора. Эта концепция объединяет комплексную систему предотвращения травматизма, сочетающую технические, организационные и поведенческие мероприятия.

Проведённый литературный обзор подтверждает согласованность представленных выводов с результатами исследований [9, 10], подчёркивающих значимость барьерных систем безопасности в профилактике производственного травматизма. При этом ранее предложенные методы акцентируют внимание на оценке результативности отдельных барьеров, тогда как в данном исследовании учитывается динамика изменения их функций.

Динамический характер модели позволяет отражать изменение условий эксплуатации, влияющих на надёжность и устойчивость защитных механизмов, что повышает эффективность превентивных мер. Таким образом, применение предложенного подхода предоставляет специалистам по охране труда и производственным руководителям возможность:

- получить более полную и точную оценку уровня защищённости рабочих мест;
- обосновывать профилактические мероприятия, направленные на предупреждение производственного травматизма, при решении вопросов целесообразности их внедрения;
- своевременно реализовывать профилактические меры;
- прогнозировать возможные нежелательные события.

Преимущество подхода — его совместимость с инструментами оперативного мониторинга, например, с любыми формами производственного контроля, действующими на рассматриваемом объекте. Это повышает качество производственного контроля, отсутствие которого в должной мере, в свою очередь, стало причиной 61,5 % травматизма в Российской Федерации в 2024 году, зарегистрированного по причине неудовлетворительной организации производства работ.

Несмотря на указанные достоинства, барьерно-ориентированный подход имеет ограничения в универсальности и масштабируемости. Требуется адаптация к особенностям различных отраслей и конкретных производственных условий. Сложность внедрения связана с необходимостью сбора, накопления и обработки большого объёма информации о текущем состоянии барьеров и истории их отказов. Для получения достоверной оценки вероятности реализации опасности предъявляются высокие требования к точности и полноте данных по критериям эффективности (Ni) и устойчивости (Si) барьеров безопасности. При этом человеческий фактор при подготовке исходных данных остаётся потенциальным источником погрешностей.

Преодоление указанных ограничений возможно при расширении объёма собираемой статистики, разработке программного модуля, реализующего предлагаемую модель, внедрении современных технологий мониторинга технического состояния объектов и применении методов машинного обучения. Эти мероприятия обеспечат непрерывный контроль состояния барьеров безопасности и повысят точность оценки вероятности реализации опасности.

Заключение. В результате исследования разработан барьерно-ориентированный подход к оценке и управлению риском травмирования персонала, основанный на учёте эффективности и устойчивости барьеров безопасности. Показано, что предложенная модель может быть интегрирована с существующими системами оперативного мониторинга в области охраны труда, что способствует повышению качества управления рисками.

Установлено, что практическая реализация подхода ограничена требованием наличия достоверных данных о состоянии барьеров и их отказах, а также влиянием человеческого фактора при подготовке исходной информации. Эти ограничения снижают универсальность и масштабируемость модели и требуют её адаптации к специфике отдельных отраслей и производственных условий.

Перспективы дальнейших исследований связаны с наращиванием статистической базы, созданием программного модуля на основе предложенной модели, а также применением современных технологий мониторинга технического состояния объектов и методов машинного обучения для автоматизации сбора и обработки данных. Реализация указанных направлений позволит обеспечить непрерывный контроль состояния барьеров безопасности и повысить точность оценки вероятности реализации опасности.

Таким образом, предложенный подход обладает практической значимостью для управления риском травмирования персонала и может способствовать снижению уровня производственного травматизма.

Список литературы / References

1. Бисенгалиев А., Дауталин К.А., Митрофановская Ю.В., Мариныч О.В., Шамсутдинова К.Н. Обзор мировых тенденций в области охраны труда и здоровья работников, снижения и предупреждения случаев производственного травматизма с позиции мониторинга профессиональной пригодности. *Национальная ассоциация ученых*. 2024;99:21–26.

Bissengaliyev A, Dautalin DA, Mitrofanskaya YuV, Marynich OV, Shamsutdinova KN. Overview of Global Trends in Occupational Safety and Health of Employees, Reduction and Prevention of Occupational Injuries from the Standpoint of Monitoring Professional Suitability. *National Association of Scientists*. 2024;99:21–26. (In Russ.)

2. Haddon WJr. Energy Damage and the 10 Countermeasure Strategies. *Injury Prevention*. 1995;1(1):40–44. <https://doi.org/10.1136/ip.1.1.40>

3. Жуков И.С. Барьеры безопасности: понятие, классификация, концепции. *Безопасность труда в промышленности*. 2017;1(5):49–56. <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-5-49-56>

Zhukov IS. Safety Barriers: Notion, Classification, Concepts. *Occupational Safety in Industry*. 2017;1(5):49–56. (In Russ.) <https://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-5-49-56>

4. Пааске Б., Лисанов М.В., Сафонов В.С., Петрулевич А.А. Российско-норвежский проект Баренц-2020: гармонизация стандартов в области анализа риска. *Безопасность труда в промышленности*. 2011;1(4):11–15.

Paaske B, Lisanov MV, Safonov VS, Petrulevich AA. The Russian-Norwegian Barents 2020 Project: Harmonization of Standards in the Field of Risk Analysis. *Occupational Safety in Industry*. 2011;1(4):11–15. (In Russ.)

5. Nima Khakzad, Faisal Khan, Paul Amyotte. Dynamic Risk Analysis Using Bow-Tie Approach. *Reliability Engineering & System Safety*. 2012;104:36–44. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2012.04.003>

6. de Ruijter A, Guldenmund F. The Bowtie Method: A Review. *Safety Science*. 2016;88:211–218. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.03.001>

7. Willey RJ. Layer of Protection Analysis. *Procedia Engineering*. 2014;84(1):12–22. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.405>

8. Darwish AS, Mansour MS, Farag H, Ezzat KH. Applying LOPA and Fuzzy Logic to Identify SIL Requirement for Safety Critical Functions in a Direct Reduction Iron Industry. *Alexandria Engineering Journal*. 2020;59(5):3575–3585. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.06.003>

9. Федорец А.Г. Практическая реализация современных принципов риск-менеджмента в национальном стандарте ГОСТ Р 12.0.011–2017. *Безопасность и охрана труда*. 2018;1(4):10–15.

Fedorets AG. Practical Implementation of Modern Principles of Risk Management in the National Standard GOST R 12.0.011–2017. *Bezopasnost' i Okhrana Truda*. 2018;1(4):10–15. (In Russ.)

10. Мажкенов С.А. Формализованный подход к оценке экономической эффективности мероприятий по охране труда. *Экономика труда*. 2022;9(8):1295–1306. <https://doi.org/10.18334/et.9.8.114790>

Mazhkenov SA. A Formalized Approach to Assessing the Economic Effectiveness of Labour Protection Measures. *Russian Journal of Labour Economics*. 2022;9(8):1295–1306. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/et.9.8.114790>

11. Balmert PD. *Alive and Well at the End of the Day: The Supervisor's Guide to Managing Safety in Operations*. New York: John Wiley & Sons; 2010. 274 p.

12. Friis RH. *Occupational Health and Safety for the 21st Century*. Burlington, MA: Jones & Bartlett Learning; 2020. 429 p.

13. Карначев И.П., Левашов С.П., Челтыбашев А.А., Панарин В.М. О концепциях и методах оценки уровня рисков травматизма, связанных с профессиональной деятельностью работников. *Известия тульского государственного университета. Науки о земле*. 2018;1(3):94–104.

Karnachev IP, Levashov SP, Cheltybashev AA, Panarin VM. About Concepts and Methods of Assessing the Level of Risk by Injury Related to the Professional Activity of Employees. *News of the Tula State University. Sciences of Earth*. 2018;1(3):94–104. (In Russ.)

14. Потоцкий Е.П., Гарт В.А. Оценка риска травмирования персонала с учетом показателя профессиональной пригодности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;1(1):144–153. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-1-144-153>

Pototskii EP, Gart VA. Assessment of the Risk of Injury of Personnel Taking into Account the Indicator of Professional Suitability. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;1(1):144–153. (In Russ.) <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-1-1-144-153>

15. Мажкенов С.А. Оценка и управление профессиональными рисками на основе модифицированного метода контрольных листов. *Экономика труда*. 2023;10(12):2145–2156. <https://doi.org/10.18334/et.10.12.119798>

Mazhkenov SA. Assessment and Management of Occupational Risks Based on the Modified Checklist Method. *Russian Journal of Labour Economics*. 2023;10(12):2145–2156. (In Russ.) <https://doi.org/10.18334/et.10.12.119798>

Об авторах:

Виктория Алексеевна Гарт, аспирант, кафедра «Техносферной безопасности» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» (119049, Российская Федерация, г. Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1.), SPIN-код, [ORCID](https://orcid.org/), gart_v@mail.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Victoria A. Gart, Postgraduate Student of the Technosphere Safety Department, National University of Science and Technology MISIS (4, Leninsky Ave, building 1, Moscow, 119049, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), gart_v@mail.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 22.12.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 16.01.2026

Принята к публикации / Accepted 28.01.2026