



БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

№1 2023

SAFETY OF TECHNOGENIC AND NATURAL SYSTEMS

n.1 2023

ISSN 2541-9129

DOI 10.23947/2541-9129

Сетевой электронный теоретический и научно - практический журнал

Network Electronic Journal

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

**Безопасность
техногенных и
природных систем**

№ 1, 2023

Сетевой электронный журнал

Издаётся с 2017 г.

Выходит 4 раза в год
(февраль, май, август, ноябрь)
декабрь 2022 г. – февраль 2023 г.

ISSN 2541-9129
DOI: 10.23947/2541-9129

Учредитель и издатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ)

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. Материаловедение (технические науки)
- 2.10.1. Пожарная безопасность (технические науки)
- 2.10.2. Экологическая безопасность (технические науки)
- 2.10.3. Безопасность труда (технические науки)

Индексируется и архивируется в Российском индексе научного цитирования (РИНЦ), CyberLeninka, ROAD, GoogleScholar.

Является членом Ассоциации научных редакторов и издателей (АНРИ) и CrossRef.

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

Над номером работали:

И. В. Бойко, Д. С. Богатырева (англ. версия)

Адрес учредителя, издателя и редакции:

344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-372

Е-mail: spu-10.2.3@donstu.ru

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



Редакционная коллегия:

Главный редактор — Б. Ч. Месхи, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

заместитель главного редактора — А. А. Короткий, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

заместитель главного редактора — В. Н. Азаров, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация);

ответственный редактор — М. Г. Комахидзе, кандидат химических наук, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

ответственный секретарь — Г. Ш. Хазанович, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

ответственный секретарь — Н. А. Шевченко, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

Н. Х. Абдрахманов, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация);

Е. В. Агеева, доктор технических наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация);

Е. В. Агеев, доктор технических наук, профессор, Юго-Западный государственный университет (Курск, Российская Федерация);

А. П. Амосов, доктор физико-математических наук, профессор, Самарский государственный технический университет (Самара, Российская Федерация);

Н. И. Баурова, доктор технических наук, профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (Москва, Российская Федерация);

В. И. Беспалов, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Ю. И. Булыгин, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

Э. Ю. Воронова, доктор технических наук, доцент, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация);

В. Л. Гапонов, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

О. С. Гурова, доктор технических наук, доцент, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

В. О. Гутаревич, доктор технических наук, доцент, Донецкий национальный технический университет (Донецк, Российская Федерация);

В. Б. Деев, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация);

В. В. Дерюшев, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

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

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

Ж. В. Еремеева, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Российская Федерация);

В. Г. Копченков, доктор технических наук, профессор, Северо-Кавказский федеральный университет (Ставрополь, Российская Федерация);

А. В. Лагереv, доктор технических наук, профессор, Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация);

И. А. Лагереv, доктор технических наук, доцент, Брянский государственный университет имени академика И. Г. Петровского (Брянск, Российская Федерация);

К. П. Манжула, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Российская Федерация);

Н. В. Мензелинцева, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет (Волгоград, Российская Федерация);

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

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

А. С. Носенко, доктор технических наук, профессор, Шахтинский автодорожный институт (филиал) ЮРГПУ (НПИ) (Шахты, Российская Федерация);

М. С. Плешко, доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС (Москва, Российская Федерация);

В. Н. Пустовойт, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

С. Л. Пушенко, доктор технических наук, профессор, Донской государственный технический университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация);

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

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

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

И. Ф. Хафизов, доктор технических наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация);

Ф. Ш. Хафизов, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный нефтяной технический университет (Уфа, Российская Федерация);

А. Н. Чукарин, доктор технических наук, профессор, Ростовский государственный университет путей сообщения (Ростов-на-Дону, Российская Федерация).

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Н. Н. Азимова, М. В. Бедоидзе, С. Н. Холодова, Т. А. Мокина, Т. А. Заирова, А. С. Ермаков.* Статистическая оценка биогенного риска для человеческой популяции со стороны новых вирусных инфекций на примере COVID-19..... 4
- О. Н. Апанасюк, С. Л. Гаврилов, С. А. Шикин, А. Е. Пименов.* Исследование влияния лесных и торфяных пожаров на радиационную обстановку в юго-западных районах Брянской области 16
- А. В. Будовский, Ю. И. Булыгин, А. В. Павликов, А. В. Трюхан* Снижение виброакустической активности плавучих средств при использовании вибродемпфирующих материалов..... 28
- Е. И. Головина, Д. А. Соколов* Обеспечение безопасности труда при эксплуатации железнодорожного транспорта путем модернизации систем вибродемпфирующих накладок и рельсовых пластин 39
- О. В. Денисов, К. В. Хохлова, М. В. Грибашов* Применение технологий геопозиционирования, мониторинга для блокирования и тушения степных пожаров и хлебных массивов..... 47

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- А. В. Панфилов, Н. Н. Николаев, А. Р. Юсупов, А. А. Короткий* Интегральная оценка риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения..... 56

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачев, И. В. Иванков* Структурная организация стали для обеспечения безопасности специальной техники 70

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



Научная статья

УДК 519.6:616-036.2

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-4-15>

Статистическая оценка биогенного риска для человеческой популяции со стороны новых вирусных инфекций на примере COVID-19

Н. Н. Азимова  , М. В. Бедондзе , С. Н. Холодова , Т. А. Мокина , Д. Х. Заирова ,
А. С. Ермаков 

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

 arkomaazimov@mail.ru

Аннотация

Введение. Понимание эпидемической кривой и пространственно-временной динамики вируса SARS-CoV-2 имеет фундаментальное значение для работы системы здравоохранения в периоды эпидемии и пандемии. Во-первых, полученные данные позволяют оценивать эпидемиологические характеристики вируса. Во-вторых, появляется возможность разрабатывать и координировать меры противодействия распространению COVID-19, обоснованно распределять ресурсы. Цель представленной работы — создание и инициализация математической модели эпидемического процесса, которая позволяет объяснить наблюдаемую динамику, прогнозировать ее развитие и оценивать достоверность таких прогнозов.

Материалы и методы. Научные изыскания основывались на анализе статистических данных. Сконструирована иерархия математических моделей, описывающих динамику распространения новой коронавирусной инфекции (COVID-19) и смертности ковид-положительных пациентов с 12.02.2020 по 22.09.2021. Субмодель заболеваемости отражает регулярные (апериодическую и периодическую), а также случайную составляющие. Для изучения и прогнозирования процессов использовали классическую технику исследования временных рядов, задействовали корреляционный и Фурье-анализ. Такой подход позволил с помощью метода моментов выявить статистические свойства объекта научных изысканий, а затем визуализировать этапы и алгоритм работы.

Результаты исследования. Математически исследованы оптимистичный, пессимистичный и промежуточный сценарий распространения инфекции. Отмечены их сильные и слабые стороны. Систематизированы в виде таблиц числовые характеристики трендовой модели и модели колебаний заболеваемости COVID-19. На основе этих данных сформулирован вывод об оптимальности пессимистичной модели: после максимально высоких показателей кривая заражений выходит на плато, и вирус остается в популяции. Установлено, что распространение новой коронавирусной инфекции имеет ярко выраженный сезонный характер с периодом 1/3 года. Математический анализ и моделирование динамики смертности ковид-положительных пациентов позволили выявить еженедельные колебания уровня летальных исходов. При этом оказалось, что максимальный риск соответствует 15-му и 22-му дню заражения. Согласно предложенной авторами гипотезе, данный вирус будет характерен для человеческой популяции. Смертность, предположительно, составит 1,75 %. Расчеты показали, что влияние случайных составляющих заболеваемости и смертности будет соответствовать сезонным колебаниям.

Обсуждение и заключения. Установлена вероятная периодичность эпидемии — трижды в год. Потенциальный уровень смертности определен как постоянный. Он обусловлен эпидемиологическими и организационными причинами, т. е. работой медицинских учреждений и органов власти. С учетом особенностей нового штамма коронавируса (омикрон) можно прогнозировать дальнейшую динамику пандемии и давать рекомендации относительно ее предупреждения. Авторы полагают, что трижды в год необходимо проводить вакцинацию. Оптимальные периоды прививочных кампаний: 05.02–15.02, 17.05–28.05, 24.09–5.10.

Ключевые слова: эпидемия, пандемия, новая коронавирусная инфекция, SARS-CoV-2, COVID-19, смертность ковид-положительных пациентов, эпидемиологические характеристики вируса, противодействие распространению COVID-19, математическая модель эпидемического процесса, сценарий распространения инфекции, трендовая модель COVID-19, модель колебаний заболеваемости COVID-19, омикрон, рекомендуемые периоды вакцинации, прививочные кампании.

Благодарности. Авторы выражают особую благодарность консультанту научного проекта О. В. Яценко, доценту, кандидату физико-математических наук, который внес значительный вклад в построение математической модели распространения COVID-19 и сделал ценные замечания при оформлении данной работы.

Для цитирования. Статистическая оценка биогенного риска для человеческой популяции со стороны новых вирусных инфекций на примере COVID-19 / Н. Н. Азимова, М. В. Бедойдзе, С. Н. Холодова [и др.] // Безопасность техногенных и природных систем. — 2023. — № 1. — С. 4–15. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-4-15>

© Азимова Н. Н., Бедойдзе М. В., Холодова С. Н., Мокина Т. А., Заирова Д. Х., Ермаков А. С., 2023

Original article

Statistical Assessment of Biogenic Risk for the Human Population from New Viral Infections Based on COVID-19

Nataliya N. Azimova , Maria V. Bedoidze , Svetlana N. Kholodova , Tatyana A. Mokina ,
Dzhakhgungul Kh. Zairova , Aleksandr S. Ermakov 

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ arkomaazimov@mail.ru

Abstract

Introduction. Understanding the epidemic curve and spatiotemporal dynamics of SARS-CoV-2 virus is of fundamental importance for the work of the health system during epidemic and pandemic periods. Firstly, the data obtained allow us to assess the epidemiological characteristics of the virus. Secondly, it becomes possible to develop and coordinate measures to counter the spread of COVID-19, to allocate resources reasonably. The work objective is to create and initialize a mathematical model of the epidemic process, which makes it possible to explain the observed dynamics, to predict its development and to assess the reliability of such forecasts.

Materials and Methods. Scientific research was based on the statistical data analysis. A hierarchy of mathematical models describing the dynamics of the spread of a new coronavirus infection (COVID-19) and the mortality of COVID-positive patients from 12.02.2020 to 22.09.2021 has been constructed. The incidence submodel reflects regular (aperiodic and periodic), as well as random components. To study and predict the processes, the classical technique of time series research, correlation and Fourier analysis were used. This approach allowed using the method of moments to identify the statistical properties of the scientific research object, and then visualize the stages and algorithm of work.

Results. An optimistic, pessimistic and intermediate scenario of infection spread has been mathematically investigated. Their strengths and weaknesses are noted. Numerical characteristics of the trend model and the model of fluctuations in the incidence of COVID-19 are systematized in the form of tables. Based on these data, a conclusion is formulated about the optimality of the pessimistic model: after the highest possible indicators, the infection curve reaches a plateau, and the virus remains in the population. It has been established that the spread of a new coronavirus infection has a pronounced seasonal character with a period of 1/3 of the year. Mathematical analysis and modeling of the mortality dynamics of COVID-positive patients revealed weekly fluctuations in the level of deaths. At the same time, it turned out that the maximum risk corresponds to the 15th and 22nd day of infection. According to the hypothesis proposed by the authors, this virus will be characteristic of the human population. The mortality rate is expected to be 1.75 %. The calculations have shown that the influence of random components of morbidity and mortality will correspond to seasonal fluctuations.

Discussion and Conclusion. The probable frequency of the epidemic has been established — three times a year. The potential mortality rate is determined as constant. It is caused by epidemiological and organizational reasons, i.e. the work of medical institutions and authorities. Taking into account the features of the new coronavirus strain (omicron), it is possible to predict the further dynamics of the pandemic and make recommendations regarding its prevention. The authors believe that vaccination should be carried out three times a year. Optimal periods of vaccination campaigns: 05.02–15.02, 17.05–28.05, 24.09–5.10.

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

Keywords: epidemic, pandemic, new coronavirus infection, SARS-CoV-2, COVID-19, mortality of COVID-positive patients, epidemiological characteristics of the virus, counter the spread of COVID-19, mathematical model of the epidemic process, infection spread scenario, COVID-19 trend model, COVID-19 incidence fluctuation model, omicron, recommended vaccination periods, vaccination campaigns.

Acknowledgements. The authors would like to thank the scientific project consultant O. V. Yatsenko, associate professor, Cand. Sci. (Eng.), who made a significant contribution to the construction of a mathematical model of COVID-19 spread and made valuable comments in the design of this work.

For citation. N. N. Azimova, M. V. Bedoidze, S. N. Kholodova, T. A. Mokina, Dz. Kh. Zairova, A. S. Ermakov. Statistical Assessment of Biogenic Risk for the Human Population from New Viral Infections Based on COVID-19. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2023, no.1, pp. 4–15. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-4-15>

Введение. Понимание эпидемической кривой и пространственно-временной динамики распространения вируса SARS-CoV-2 необходимо, во-первых, для оценки его эпидемиологических характеристик. Кроме того, оно позволяет прорабатывать и реализовать меры противодействия распространению коронавирусной инфекции (COVID-19), рационально распределять ресурсы. Цель данной работы — создание математической модели эпидемического процесса, которая дает возможность объяснить наблюдаемую динамику, прогнозировать распространение инфекции и оценивать достоверность таких прогнозов. COVID-19 — это новое заболевание, поэтому его изучают посредством детального мониторинга заражений и смертности. Результаты интерпретируют с помощью математических моделей и связанных с ними аналитических подходов [1–2]. Знание эволюционных закономерностей и числовых показателей эпидемических болезней позволяет своевременно купировать процесс, задействуя официальные медицинские и другие организационные ресурсы [3–4]. Достоверный фактический материал по заболеваемости COVID-19 и связанной с ним смертности в мировом масштабе [5] публикуется на ресурсе [worldometers.info](https://www.worldometers.info)¹ (рассматривается период с 12.02.2020 по 22.09.2021). Использование этих данных в некоторой степени снижает погрешности регионального и временного мониторинга, но может препятствовать выявлению локальных динамических параметров процесса. Однако продолжительность зафиксированных в [5] наблюдений позволяет надеяться, что указанный недостаток нивелирует техника анализа временных рядов [6].

Имеющиеся в нашем распоряжении данные о динамике заболеваемости и смертности ковид-положительных пациентов с 12.02.2020 по 22.09.2021 взяты из [worldometers.info](https://www.worldometers.info). На их основе авторы построили диаграммы (рис. 1–2).

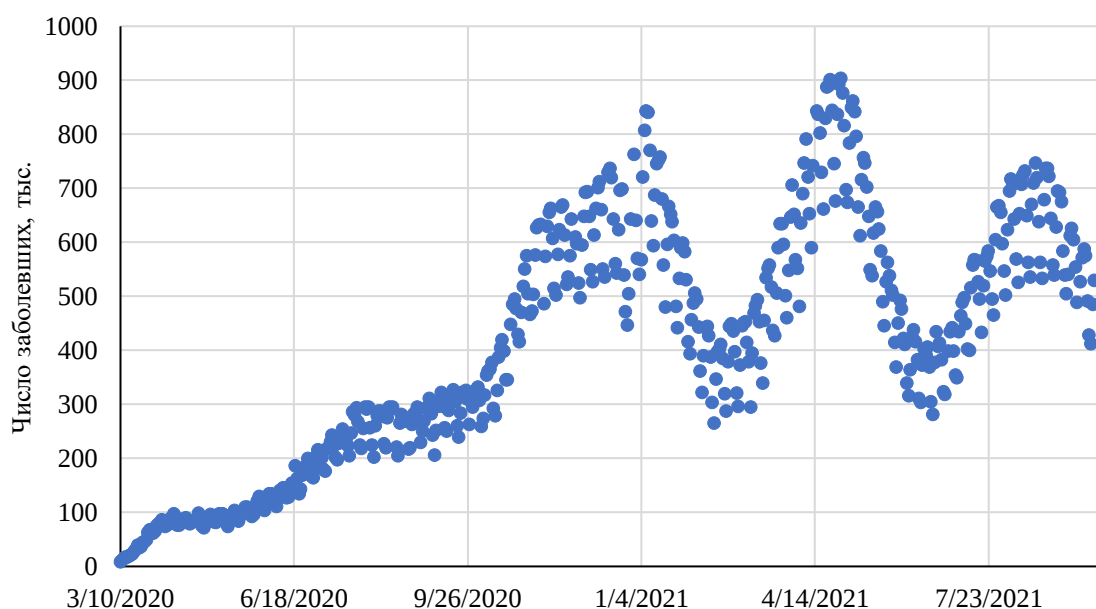


Рис. 1. Данные по заболеваемости COVID-19

Авторы поставили задачу проанализировать связь смертности (зафиксированной впоследствии) с этапом пандемии и уровнем заболеваемости. Для этого исходные данные группировались по кварталам

¹ Covid-19 coronavirus pandemic / [International team of developers, researchers, and volunteers] // <https://www.worldometers.info/coronavirus/> (дата обращения: 10.01.2023). URL: <https://www.bps-journal.ru>

(3 месяца). На рис. 2 они обозначены точками определенного цвета. Такой подход визуализирует представление преобразованных данных о смертности, в которых моменты смерти явно не фигурируют.

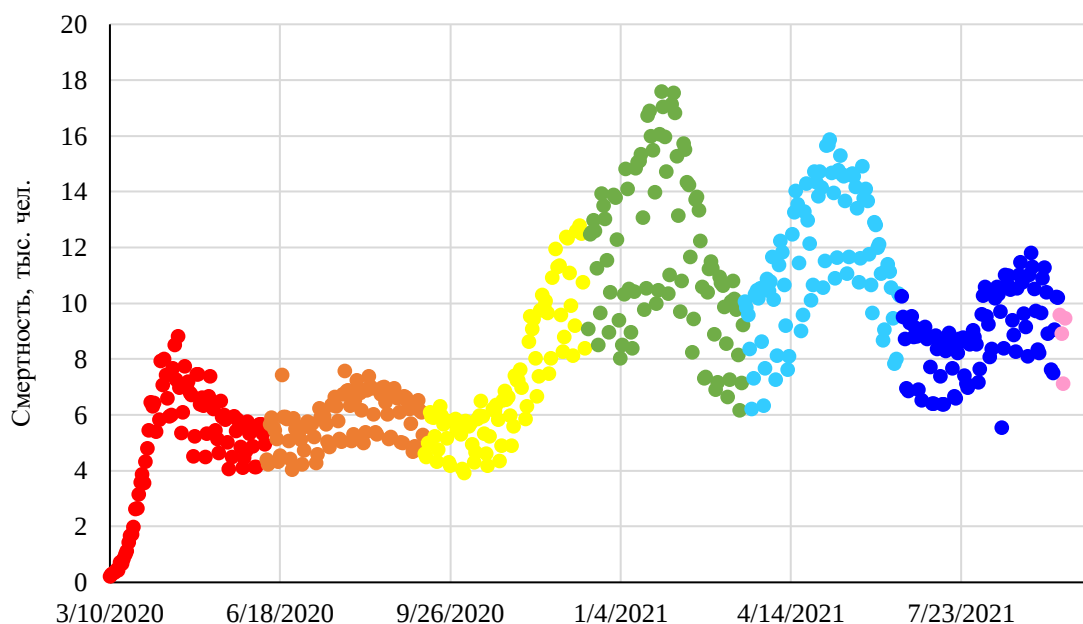


Рис. 2. Фактические данные по смертности ковид-положительных пациентов. Красными точками обозначен период пандемии с 12.02.20 по 9.06.20; оранжевыми — с 10.06.20 по 10.09.20; желтыми — с 11.09.20 по 14.12.20; зелеными — с 16.12.20 по 17.03.21; голубыми — с 18.03.21 по 17.06.21; синими — с 18.06.21 по 18.09.21; сиреневыми — с 19.09.21 по 22.09.21

Материалы и методы. Рассмотренные данные представляют собой композицию регулярной и случайной составляющих. В регулярной выделяются аperiodическая и периодическая компоненты. Соответственно, анализ, интерпретация и прогнозирование в данном случае выполняются классическими средствами исследования временных рядов [6]. Речь идет о последовательном выделении тренда (aperiodической составляющей), циклической и шумовой (случайной) компонент. Каждая из них с математической точки зрения характеризуется амплитудными и (или) временными параметрами [7]. Последовательно выделим эти компоненты из фактических данных, затем опишем результаты.

В качестве математического инструментария для анализа и прогнозирования динамики COVID-19 выбрали классическую технику исследования временных рядов $\Phi(t)$ [6]. Она реализуется в несколько этапов, которые нацелены на последовательное выявление регулярной $P(t)$, колебательной $\Pi(t)$ и случайной $\xi(t)$ составляющих тренда. При этом, как правило, принимается во внимание гипотеза, что равно нулю среднее по времени значение двух последних составляющих временного ряда

$$\Phi(t) = P(t) + \Pi(t) + \xi(t), \quad (1)$$

то есть выполняется соотношение:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \xi(t) dt = 0. \quad (2)$$

Регулярная составляющая $P(t)$ выделяется первой. Алгоритмической основой здесь служит теория аппроксимации функции [7]. Она базируется на идее отыскания кривой заданного вида, максимально близкой к облаку точек, отображающих временной ряд. При этом требуется удачно выбрать шаблон аппроксимирующей ряд функции. С одной стороны, это исключительно творческая задача. С другой, она требует глубоких знаний в области математического анализа. Затем регулярная составляющая исключается из (1) и анализируется комбинация $\Phi(t) - P(t) = \Pi(t) + \xi(t)$.

Важные характеристики такого остаточного слагаемого: период и форма [8]. Для выявления периода оставляющей $\Pi(t)$ используется техника корреляционного и Фурье-анализа. В рамках автокорреляционного анализа период функции $\Pi(t)$ — это величина τ , удовлетворяющая условию

$$\frac{1}{T} \int_0^T \Pi(t) \cdot \Pi(t + \tau) dt \rightarrow \max, \quad (3)$$

где $[0 \dots T]$ — интервал наблюдения за величиной $\Pi(t)$.

Использование для той же цели дискретного преобразования Фурье позволяет локализовать величину τ в узком интервале. Зная τ , можно выявить форму периодической составляющей, но часто исследователи ограничиваются первой гармоникой.

Заключительный этап — выявление статистических свойств $\xi(t) = \Phi(t) - P(t) - \Pi(t)$. Для этого наиболее удобен метод моментов [9]. Он работает так: сравниваются фактические моменты шума ряда $\xi(t)$ с моментами модельных шумов, задаваемых известными функциями распределения $F(\xi)$. Описанная схема анализа временного ряда $\Phi(t)$ показана на рис. 3.

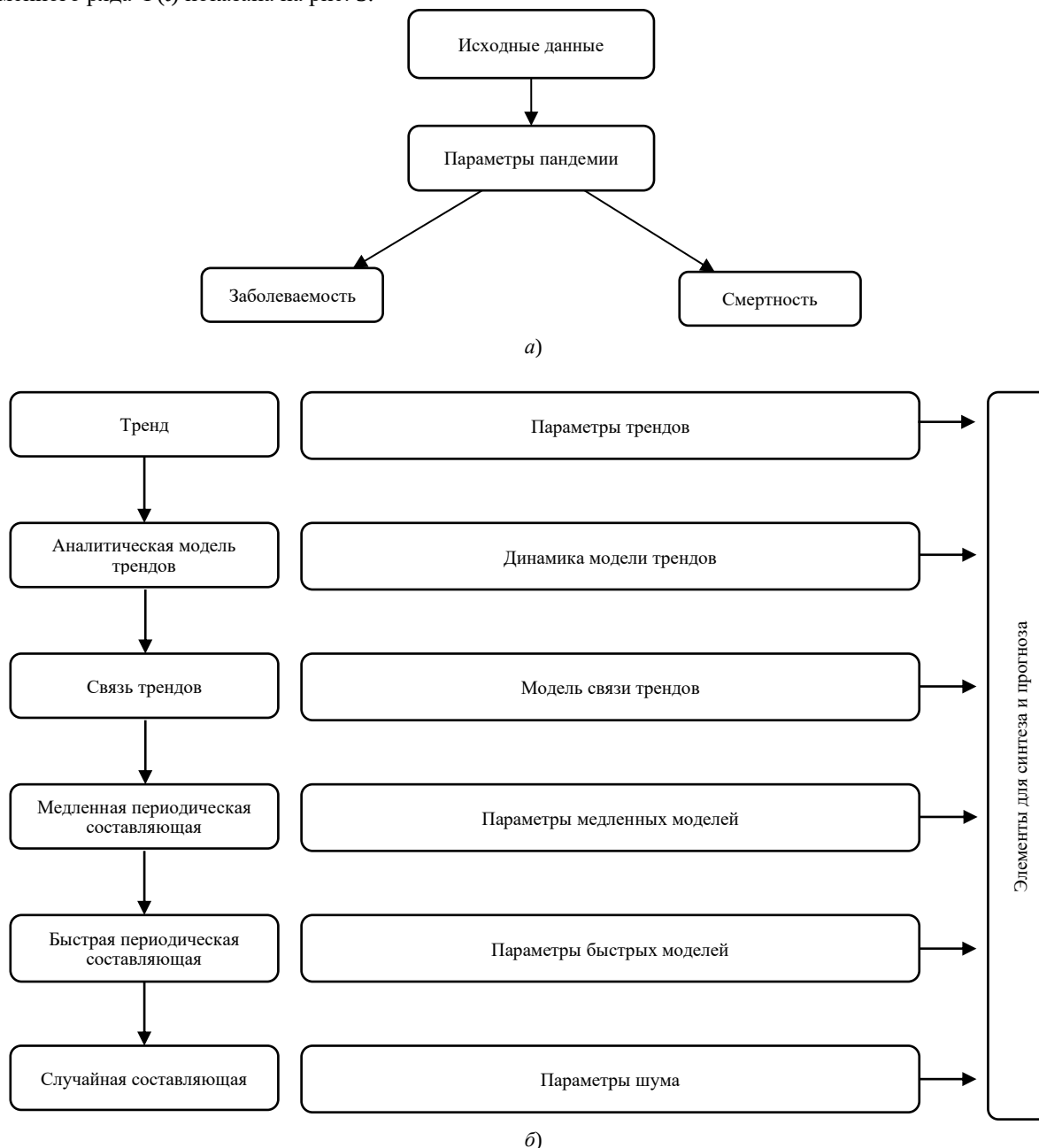


Рис. 3. Анализ временного ряда заболеваемости и смертности ковид-положительных пациентов:
а — этапы по фокусу изысканий; б — алгоритм исследования

Результаты исследования. Известно, что любой эпидемический процесс в начальной стадии характеризуется экспоненциальной во времени динамикой [10], т. е.

$$N(t) = A \cdot e^{Bt}, \quad (4)$$

где N — число заболевших; A и B — некоторые положительные числа.

Дальнейшее развитие эпидемии может происходить по оптимистичному или пессимистичному сценарию. В первом случае эпидемия достигает некоторого пика и сходит на нет. Зависимость численности заболевших в некоторый момент имеет вид:

$$N_{\text{опт}}(t) = \frac{A}{ch^2(Bt+C)}, \quad (5)$$

где A, B, C — коэффициенты модели; ch — гиперболический косинус.

Этому сценарию соответствует дифференциальное уравнение:

$$\frac{dN_{\text{опт}}(t)}{dt} = \pm 2BN_{\text{опт}}(t) \sqrt{1 - \frac{N_{\text{опт}}(t)}{A}}. \quad (6)$$

Здесь знак «плюс» реализуется при $N_{\text{опт}}(t) < A$ вплоть до момента t^* , при котором $N_{\text{опт}}(t^*) = A$. Начиная с этого момента в формуле (6) реализуется знак «минус». Согласно (6), по достижении некоторого критического числа заболевших A заболеваемость начнет монотонно снижаться.

Пессимистичный сценарий подразумевает, что развивающаяся изначально по экспоненте эпидемия со временем также экспоненциально выходит на плато, т. е. возбудитель остается в пораженной им популяции. Это можно описать эволюционной зависимостью

$$N_{\text{песс}}(t) = 2A(1 + th(Bt + C)), \quad (7)$$

которой соответствует дифференциальное уравнение:

$$\frac{dN_{\text{песс}}(t)}{dt} = 2AB \left(1 - \left(1 - \frac{N_{\text{песс}}(t)}{A}\right)^2\right). \quad (8)$$

Здесь th — гиперболический тангенс. В (7) и (8) множитель 2 добавлен из соображений совпадения стартовой асимптотики, т. е. для выполнения естественного соотношения:

$$\lim_{t=t_0 \rightarrow -\infty} \frac{N_{\text{опт}}(t)}{N_{\text{песс}}(t)} = 1. \quad (9)$$

Промежуточный сценарий эпидемии сочетает элементы двух рассмотренных и предполагает следующие стадии:

- 1) первичный экспоненциальный рост;
- 2) насыщение и последующий спад;
- 3) выход на ненулевое плато.

Динамику заболеваемости в этом случае описывает линейное сопряжение формул (5) и (7) с весом D :

$$N(t) = \frac{AD}{ch^2(Bt+C)} + 2A(1-D)(1 + th(Bt + C)), \quad (10)$$

где D — коэффициент, отражающий вклад оптимистичного и пессимистичного сценария в совокупный процесс.

Решению (10) соответствует нелинейное дифференциальное уравнение высокого порядка [11], которое опустим из-за его громоздкости.

Для нахождения коэффициентов A, B, C, D необходимо решить задачу математического программирования [12] в ее общем виде:

$$\sum_{i=1}^I (N(t_i) - N_i^{\text{факт}})^2 = \sum_{i=1}^I \left(\frac{AD}{ch^2(Bt_i+C)} + 2A(1-D)(1 + th(Bt_i + C)) - N_i^{\text{факт}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (11)$$

где $N_i^{\text{факт}}$ и t_i — соответственно заболеваемость и момент ее фиксации.

Условие экстремума (11) отвечает обобщенному сценарию эпидемии. В частных случаях моделей (5) и (7) к (11) следует добавить ограничения $D = 1$ или

$$D = 0, \begin{cases} \frac{\partial}{\partial A} \sum_{i=1}^I \left(\frac{AD}{ch^2(Bt_i+C)} + 2A(1-D)(1 + th(Bt_i + C)) - N_i^{\text{факт}} \right)^2 = 0, \\ \frac{\partial}{\partial B} \sum_{i=1}^I \left(\frac{AD}{ch^2(Bt_i+C)} + 2A(1-D)(1 + th(Bt_i + C)) - N_i^{\text{факт}} \right)^2 = 0, \\ \frac{\partial}{\partial C} \sum_{i=1}^I \left(\frac{AD}{ch^2(Bt_i+C)} + 2A(1-D)(1 + th(Bt_i + C)) - N_i^{\text{факт}} \right)^2 = 0, \\ \frac{\partial}{\partial D} \sum_{i=1}^I \left(\frac{AD}{ch^2(Bt_i+C)} + 2A(1-D)(1 + th(Bt_i + C)) - N_i^{\text{факт}} \right)^2 = 0, \\ D = 1, \\ D = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Здесь ∂ обозначен частный дифференциал. Можно также строго доказать, что система (12) эквивалентна переопределенной системе алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \frac{AD}{ch^2(Bt_i+C)} + 2A(1-D)(1 + th(Bt_i + C)) = N_i^{\text{факт}}, \quad i = 1, 2, \dots, I \\ \begin{cases} D = 1, \\ D = 0, \\ D \in \mathbb{R}, \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

варианты которой соответствуют описанным сценариям.

Результаты выявления трендовой зависимости $P(t)$ с использованием встроенных функций MS Excel [13] для всех сценариев эпидемической динамики приведены на рис. 2 и в таблице 1.

Таблица 1

Числовые характеристики трендовой модели заболеваемости COVID-19

Модели и показатели	A	B	C	D	σ, тыс. чел.	ξ
Оптимистичная	615,1483	0,003842	-1,55037	1	138,7840681	0,8058189
Пессимистичная	142,9481	0,009928	-1,5551	0	116,8074635	0,8522902
Обобщенная	353,0566	0,007984	-1,87759	0,613561	113,4654191	0,8612546

Как видно из данных таблицы, обобщенная модель (10) лучше описывает реальную ситуацию. Однако у нее есть существенный недостаток. Это сравнительная сложность и невозможность явно выписать нелинейные дифференциальные уравнения, отвечающие динамике COVID-19. В данном отношении пессимистичная модель привлекает своей простотой и, соответственно, возможностями усовершенствования.

Для идентификации колебательной составляющей в данных о смертности при COVID-19 (рис. 3) выберем следующую модель. Предположим, что реальные данные колеблются около линии тренда. В нашем случае это модели (5)–(6), (7)–(8) и (10) с амплитудой α , круговой частотой β и начальной фазой γ . Такая регулярная модель динамики эпидемии декомпозируется и описывается уравнением:

$$\tilde{N}(t) = N(t) \cdot [1 + \alpha \cdot \sin(\beta \cdot t + \gamma)],$$

$$\text{где } N(t) = \begin{cases} N(t)_{\text{опт}} & \text{согласно (5)–(6),} \\ N(t)_{\text{песс}} & \text{согласно (7)–(8),} \\ N(t)_{\text{обобщ}} & \text{согласно (10).} \end{cases} \quad (14)$$

Для отыскания параметров колебательной модели (14) необходимо решить следующую оптимизационную задачу [12]:

$$\sum_{i=1}^I (1 + \alpha \cdot \sin(\beta \cdot t_i + \gamma) - \frac{N_i^{\text{факт}}}{N(t_i)})^2 \rightarrow \min. \quad (15)$$

Если рассматривать (15) как функцию переменных α , β , γ , необходимое условие экстремума принимает вид [8]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial \alpha} \sum_{i=1}^I (1 + \alpha \cdot \sin(\beta \cdot t_i + \gamma) - \frac{N_i^{\text{факт}}}{N(t_i)})^2 = 0, \\ \frac{\partial}{\partial \beta} \sum_{i=1}^I (1 + \alpha \cdot \sin(\beta \cdot t_i + \gamma) - \frac{N_i^{\text{факт}}}{N(t_i)})^2 = 0, \\ \frac{\partial}{\partial \gamma} \sum_{i=1}^I (1 + \alpha \cdot \sin(\beta \cdot t_i + \gamma) - \frac{N_i^{\text{факт}}}{N(t_i)})^2 = 0. \end{cases} \quad (16)$$

Решение задачи (16) совпадает с решением переопределенной системы уравнений:

$$1 + \alpha \cdot \sin(\beta \cdot t_i + \gamma) = \frac{N_i^{\text{факт}}}{N(t_i)}, \quad i = 1, 2, \dots, I. \quad (17)$$

Однако практическая реализация алгоритмов (16) и (17) затруднена их неустойчивостью, обусловленной особенностями задачи [7]. В данном случае более устойчивым оказывается алгоритм, основанный на отыскании параметров модели, обеспечивающих наилучшую корреляцию фактических данных [9] и модельной функции $\tilde{N}(t)$:

$$\text{Corr}(\tilde{N}(t_i), N_i^{\text{факт}}) \rightarrow \max. \quad (18)$$

Решение (18), полученное средствами Excel [9] для вариантов модели $N(t)$ (5)–(6), (7)–(8) и (10), приведено в таблице 2.

Таблица 2

Числовые характеристики модели колебаний заболеваемости COVID-19

Модели и показатели	α	β	γ	ξ	σ, тыс. чел.
Оптимистичная	0,339708	0,049332	0,760834	0,912426	102,0689
Пессимистичная	0,264411	0,049207	0,840402	0,928869	83,29141
Обобщенная	0,273133	0,049298	7,08885	0,94078	76,13293

Представленные в таблице 2 числовые показатели адекватности моделей ξ и σ свидетельствуют, что обобщенная модель лучше соответствует фактическим данным. В то же время она значительно сложнее пессимистичной при несущественном улучшении точности. Таким образом, следует признать преимущество пессимистичной модели. Она обладает оптимальной сложностью математического описания эпидемии COVID-19, допускающей простую интерпретацию и легкость усовершенствования.

Важно отметить, что для любого тренда характерна периодичность в $127 \pm 0,5$ дней. Этот результат хорошо согласуется с данными автокорреляционного и спектрального анализа колебательной составляющей функции $\tilde{N}(t)$ (рис. 4). Таким образом зафиксировано, что всплески заболевания происходят через 124 и 110 дней. Значит, заболевание носит сезонный характер с периодом 1/3 года.

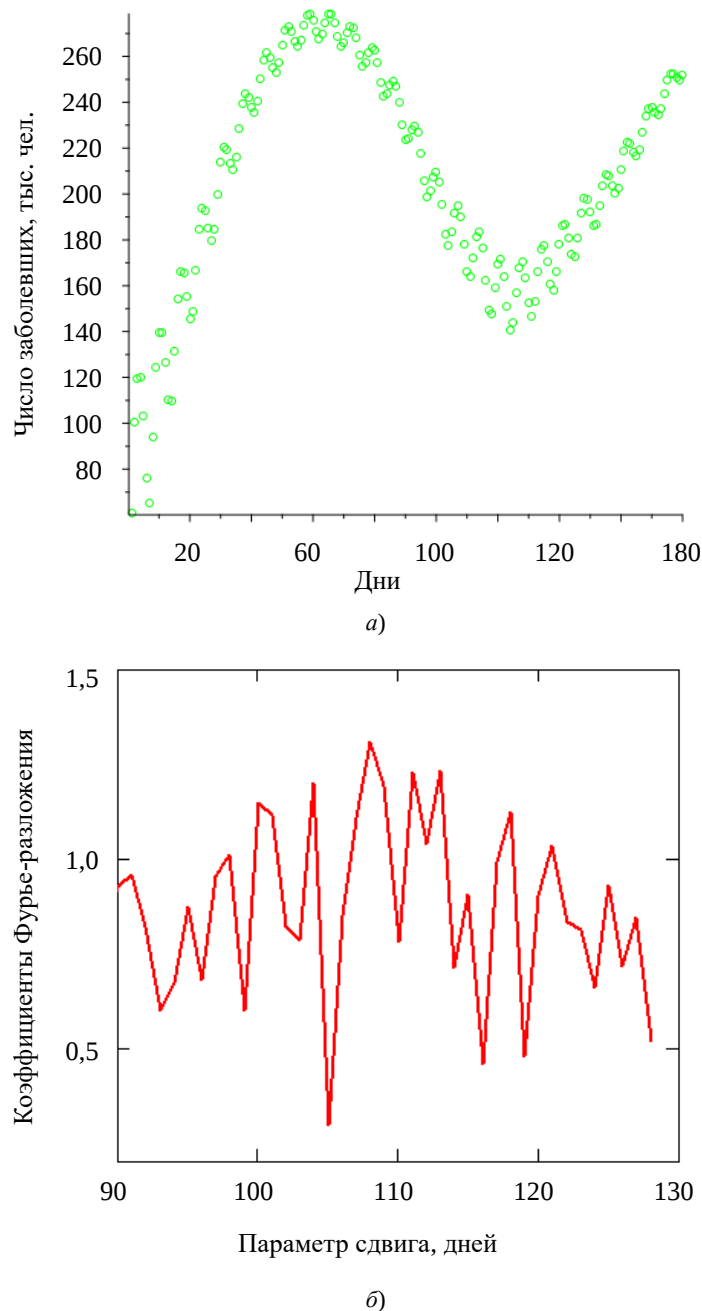


Рис. 4. Данные автокорреляционного и спектрального анализа колебательной составляющей: а — отличие динамики заболеваемости при сдвиге на различное число дней; б — коэффициенты спектрального разложения заболеваемости

Сопоставление данных таблиц 1 и 2 позволяет оценить относительную роль колебательной и шумовой составляющей. Если считать их независимыми (ортогональными) и воспользоваться известным соотношением $\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$, можно убедиться, что вклады периодической и случайной составляющих сопоставимы.

Вычитая модельные значения заболеваемости $\tilde{N}(t_i)$ из наблюдаемых $N_i^{\text{факт}}$ (или наоборот), выделяем оставшуюся шумовую компоненту модели. Результат для пессимистичного сценария показан на рис. 5.

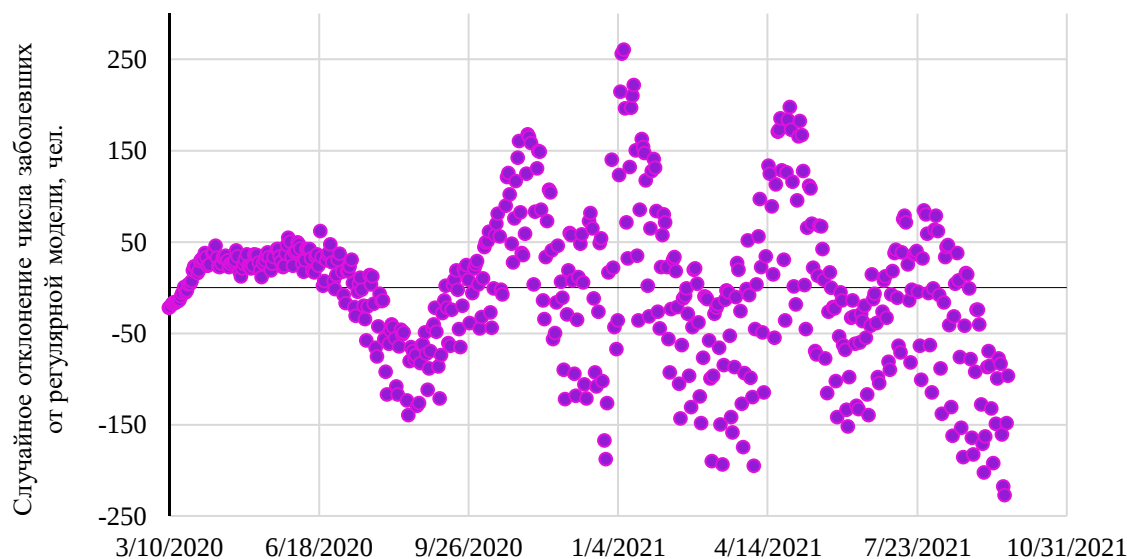


Рис. 5. Шумовая составляющая в пессимистичной модели

Числовые характеристики приведенных на рисунке данных соответствуют нормальному Гауссову распределению [9] с математическим ожиданием «ноль» и среднеквадратичным отклонением 80 тыс. заболевших в сутки, что подтверждается данными числовой идентификации:

- математическое ожидание $M = -2,87$;
- среднеквадратичное отклонение $\sigma = 79,9$;
- асимметрия $\text{Skewness} = 0,0085$;
- эксцесс $\text{Kurtosis} = 3,51$.

Таким образом, выполненная в данной работе идентификация математической модели $\tilde{N}(t) + N_{\text{случ}}$, предположительно, позволяет прогнозировать заболеваемость на весь срок развития эпидемии [5].

Аналогично анализировалась динамика смертности ковид-положительных пациентов с 12.02.2020 по 22.09.2021 (рис. 3). Учитывая, что летальный исход является вероятным результатом заражения, логично представить модель смертности:

$$M_{\text{факт}}(t + \tau) = k_{\text{лет}} \cdot N_{\text{факт}}(t). \quad (19)$$

Или с учетом аппроксимации заболеваемости:

$$\tilde{M}(t + \tau) + M_{\text{случ}} = k_{\text{лет}} \cdot (\tilde{N}(t) + N_{\text{случ}}). \quad (20)$$

Здесь M обозначена смертность; $k_{\text{лет}}$ — вероятность умереть от данного заболевания; τ — наиболее вероятное время от заражения человека до его смерти. Фигурирующие в модели смертности (19) числовые параметры $k_{\text{лет}}$ и τ будем находить, минимизируя функционал отклонения:

$$\Phi(\tau, k_{\text{лет}}) = \sum_{i=I_{\min}}^{I_{\max}-\tau} [M_{\text{факт}_{i+\tau}} - k_{\text{лет}} \cdot N_{\text{факт}_i}]^2 \rightarrow \min \quad (21)$$

с учетом естественных ограничений $0 \leq k_{\text{лет}} \leq 1, \tau \in \mathbb{N}, 1 \leq \tau \leq 30$.

Особенность решения задачи (21) состоит в том, что одна из искоемых переменных фигурирует в верхнем индексе суммирования. Поэтому решение оптимизационной задачи получим в два этапа. Первый основывается на необходимом условии экстремума $\Phi(\tau, k_{\text{лет}})$:

$$k_{\text{лет}}(\tau) = \sum_{i=I_{\min}}^{I_{\max}-\tau} (M_{\text{факт}_{i+\tau}} N_{\text{факт}_i}) \cdot \left[\sum_{i=I_{\min}}^{I_{\max}-\tau} N_{\text{факт}_{i+\tau}}^2 \right]^{-1} \quad (22)$$

для всего диапазона τ . Затем выберем пару значений $\{\tau, k_{\text{лет}}\}$, обеспечивающую минимальное значение (21).

Важно отметить, что $I_{\min}$ принимаем равным 150 дням. Допущение обусловлено тем, что первые месяцы статистика заболеваемости и смертности [5] представляется недостаточно полной и достоверной.

Решив задачу (21), получим: $k_{\text{лет}} = 0,0184 \pm 0,0003$ и $\tau = 21$ день. Более подробно связь смертности с заболеваемостью демонстрирует коррелограмма данных $M_{\text{факт}}(t + \tau)$ и $k_{\text{лет}} \cdot N_{\text{факт}}(t)$ (рис. 6).

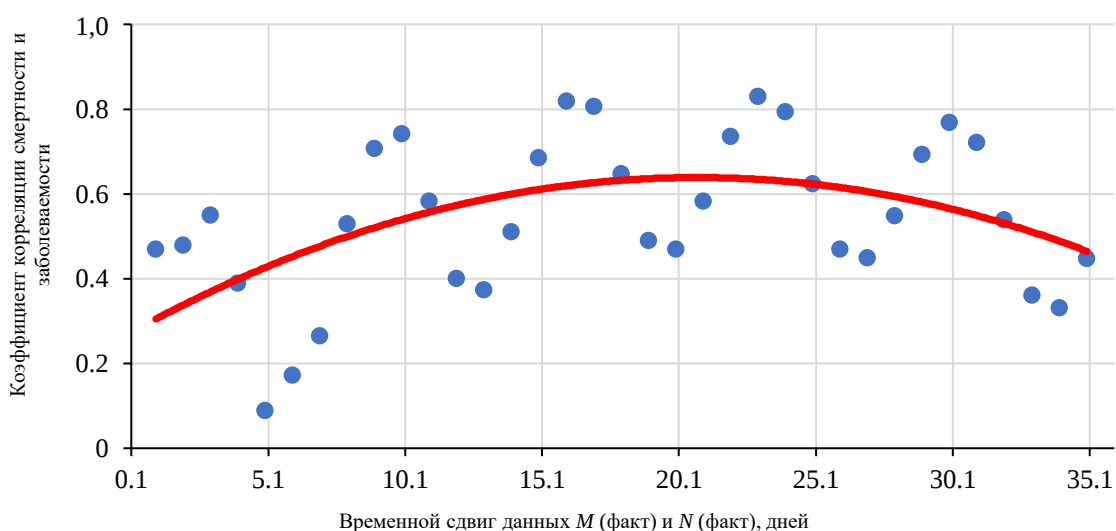


Рис. 6. Коррелограмма смертности и заболеваемости в зависимости от параметра сдвига τ

Анализ тренда показывает вероятность летального исхода при COVID-19 на 21-й день после заражения. Кроме того, очевидна периодичность риска смерти. Очищенные от тренда вариации риска смерти визуализированы на рис. 7.

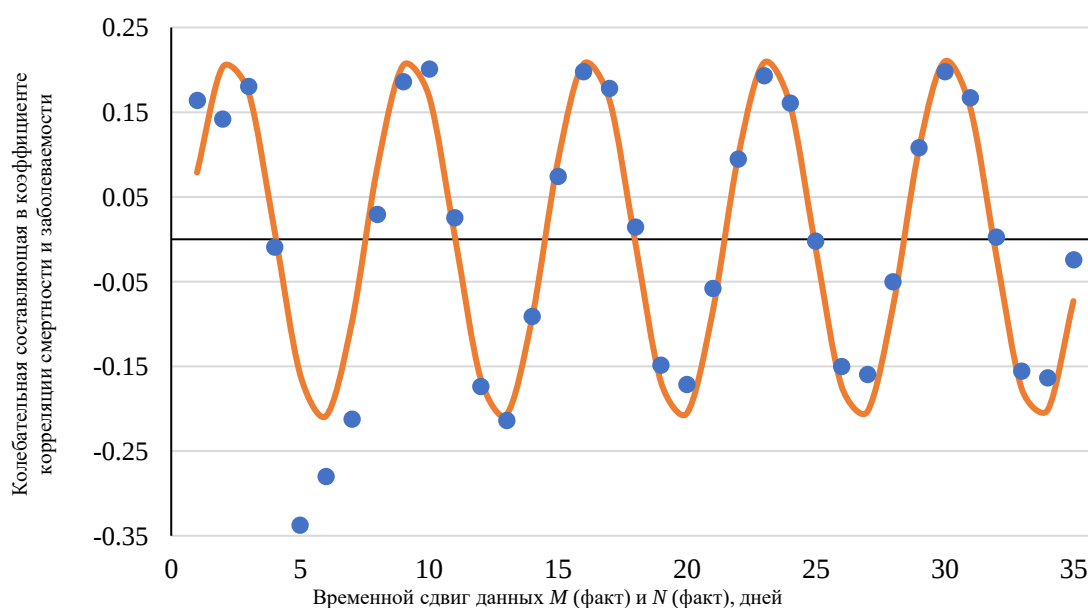


Рис. 7. Быстрая колебательная составляющая в коррелограмме смертности и заболеваемости

Согласно данным рис. 7, риск смерти при COVID-19 колеблется вокруг указанного выше среднего значения с периодом 7 дней, что полностью соответствует цикличности работы медицинских учреждений по всему миру. Аппроксимирующая данные рис. 7 аналитическая зависимость имеет вид:

$$\mu(\tau) = 0,212 \cdot \sin(0,902 \cdot \tau - 0,522) \quad (23)$$

где μ — быстрая составляющая смертности.

Обсуждение и заключения. Ниже перечислены основные итоги работы.

1. Сконструированы и инициализированы модели заболеваемости и смертности при COVID-19.
2. Установлено, что распространение коронавирусной инфекции повторяется три раза в год.
3. Смертность в среднем постоянна и содержит два колебательных элемента. Периодичность первого соответствует периодичности заболеваемости, а периодичность второго — регламенту работы медицинских учреждений.
4. По интервалу наблюдений с 12.02.2020 по 22.09.2021 можно сделать вывод, что сценарий развития эпидемии близок к пессимистическому.

5. Случайная составляющая в моделях заболеваемости и смертности оказалась на уровне сезонных колебаний.

Появившиеся в декабре 2021 года статистические данные показали, что известные штаммы COVID-19 практически вытеснены новым — омикроном. Его заразность в 3/5 раза выше, смертность во столько же раз ниже. Данное обстоятельство диктует необходимость совершенствования предлагаемых динамических моделей эпидемии с учетом вирус-конкурентного эффекта. Это цель следующих исследований коллектива авторов.

Полученные результаты принципиально позволяют не только прогнозировать дальнейшую динамику пандемии, но и формулировать практически значимые рекомендации. Например, в качестве оптимальных сроков антиковидной вакцинации «Спутником V» предлагаются следующие интервалы (ежегодно): 05.02–15.02, 17.05–28.05, 24.09–5.10.

Список литературы

1. On the reliability of predictions on Covid-19 dynamics: A systematic and critical review of modelling techniques / E. G. Janyce, V. S. Kolawole, B. K. Gaetan, G. K. Romain // *Infectious Disease Modelling*. — 2021. — V. 6. — P. 258–272. <https://doi.org/10.1016/j.idm.2020.12.008>
2. Hermanowicz, S. W. Forecasting the Wuhan coronavirus (2019-nCov) epidemics using a simple (simplistic) model / S. W. Hermanowicz // *MedRxiv*. — 2020. — February. — 10 p. <https://doi.org/10.1101/2020.02.04.20020461>
3. Lalmuanawma, S. Applications of machine learning and artificial intelligence for COVID-19 (SARS-CoV-2) pandemic: A review / S. Lalmuanawma, J. Hussain, L. Chhakchhuack // *Chaos, Solitons & Fractals*. — 2020. — V. 139, 110059. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110059>
4. Postniko, E. B. Estimation of COVID-19 dynamics «on a back-of-envelope»: Does the simplest SIR model provide quantitative parameters and predictions? / E. B. Postniko // *Chaos, Solitons & Fractals*. — 2020. — V. 135, 109841. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.109841>
5. Брантон, С. Л. Анализ данных в науке и технике / С. Л. Брантон, Дж. Н. Куц // Москва : ДМК Пресс, 2021. — 574 с.
6. Виноградов, А. Ю. Численные методы решения жестких и нежестких краевых задач / А. Ю. Виноградов. — Москва : National Research, 2017. — 112 с.
7. Pugh, Ch. C. Real Mathematical Analysis. Second Edition / Ch. C. Pugh. — Cham : Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17771-7>
8. Maheshwari, A. Data Analytics Made Accessible / A. Maheshwari. — Bellevue : Kindle Edition, 2023. — 156 p.
9. Грибова, Е. З. Физический подход к анализу диффузии частиц / Е. З. Грибова, А. И. Саичев // Нижний Новгород : Нижегородский гос. ун-т им. Н. И. Лобачевского, 2012. — 232 с.
10. Егоров, А. И. Обыкновенные дифференциальные уравнения с приложениями / А. И. Егоров. — 2-е изд., исправ. — Москва : Физматлит, 2003. — 384 с.
11. Нестеров, Ю. Е. Методы выпуклой оптимизации / Ю. Е. Нестеров. — Москва : Московский центр непрерывного математического образования, 2010. — 281 с.
12. Ben-Tal, A. Lectures on Modern Convex Optimization Analysis, Algorithms, and Engineering Applications / A. Ben-Tal, A. Nemirovski. — Philadelphia : SIAM, 2001. — 537 p.
13. Крянев, А. В. Математические методы обработки неопределенных данных / А. В. Крянев, Г. В. Лукин. — Москва : Физматлит, 2006. — 216 с.

Поступила в редакцию 02.11.2022.

Поступила после рецензирования 09.12.2022.

Принята к публикации 09.01.2023.

Об авторах

Азимова Наталья Николаевна, доцент кафедры «Прикладная математика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID, arkomaazimov@mail.ru](mailto:arkomaazimov@mail.ru)

Бедондзе Мария Васильевна, старший преподаватель кафедры «Прикладная математика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID, masha.bedoidze@gmail.com](mailto:masha.bedoidze@gmail.com)

Холодова Светлана Николаевна, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, [ORCID](#), holls9@mail.ru

Мокина Татьяна Алексеевна, бакалавр Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), mokinat337@gmail.com

Заирова Джахангул Хайруллаевна, бакалавр Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), gulyazair@gmail.com

Ермаков Александр Сергеевич, бакалавр Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), ermakov_sahsa11@mail.ru

Заявленный вклад соавторов

Н. Н. Азимова — разработка и реализация динамической модели эпидемии, разработка вычислительных алгоритмов. М. В. Бедоидзе — разработка методов статистического анализа, подготовка текста статьи. С. Н. Холодова — подбор статистических данных, формулировка выводов и рекомендаций, доработка текста. Т. А. Мокина — верификация статистических данных, сопоставление результатов имитационного эксперимента по прогнозированию динамики эпидемии с реальными данными. Д. Х. Заирова — выделение регулярных и случайных составляющих модели, проведение расчетов по модели динамики эпидемии. А. С. Ермаков — параметрическая идентификация регулярной и случайной составляющих модели, выполнение имитационного эксперимента по прогнозированию динамики эпидемии.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



Научная статья

УДК 504.064.2+504.064.36

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-16-27>

Исследование влияния лесных и торфяных пожаров на радиационную обстановку в юго-западных районах Брянской области

 О. Н. Апанасюк  , С. Л. Гаврилов , С. А. Шикин , А. Е. Пименов 

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Российская Федерация, Москва, ул. Большая Тульская, 52

 aon@ibrae.ac.ru

Аннотация

Введение. Рассмотрено влияние радиационных лесных и торфяных пожаров на распространение радиоактивного загрязнения, которое затрагивает благополучие тысяч людей. Ухудшается состояние окружающей среды на обширных территориях, развиваются негативные социально-экономические процессы. Это серьезная проблема двух государств: Российской Федерации и Республики Беларусь. Цели представленной работы: исследование радиационной обстановки в лесах и на торфяниках, расположенных в приграничных районах Брянской области, а также изучение возможности переноса радиоактивных материалов при лесных и торфяных пожарах.

Материалы и методы. Из научной литературы выделены факты, которые уточнили теоретическую базу представленного исследования. Авторы учли, в частности, что:

- активность радионуклидов в почве снижается прямо пропорционально глубине;
- торфяной пожар — это неконтролируемое горение;
- выбросы фракций цезия-137 (^{137}Cs) во время пожара могут достичь 3–4 %.

Из прикладной литературы и официальных источников известны площади лесов на радиационно загрязненных территориях (РЗТ) Брянской области, выявлены наиболее проблемные с этой точки зрения районы.

В экспедиционных исследованиях задействовали передвижную радиометрическую лабораторию, сцинтилляционный гамма-спектрометр МКС-АТ6101С. Результаты полевой гамма-спектрометрии регистрировали в трех населенных пунктах. Расчеты для гипотетического пожара выполнялись с помощью программного средства САУР АИУС РСЧС 2030.

Результаты исследования. Проанализированы последствия крупных и продолжительных пожаров в зоне отчуждения Чернобыльской атомной электростанции. Установлено, что инциденты не привели к опасным последствиям для населения. Суммарная эффективная доза ингаляций составила $\sim 0,003$ % от допустимого уровня облучения. Отмечено, однако, что почва лесов Брянской области получила значимый вред от загрязнения ^{137}Cs . Плотность такого загрязнения превысила 5 Ки/км² на 40 % пострадавших лесов. Из них на 16 % зафиксирован показатель 15–40 Ки/км² и больше, в отдельных кварталах — до 200 Ки/км². Установлено, что до 2026 года в регионе сохранятся зоны с высокой плотностью загрязнения (40 Ки/км²). Особенно проблемными представляются пять районов: Гордеевский, Злынковский, Клинцовский, Красногорский и Новозыбковский.

При фиксации и прогнозировании вреда авторы представленной работы исходили из следующего факта: при пожарах продукты горения (лесная подстилка, трава и подлесок) содержат больше радиоактивных веществ, чем кроны деревьев. В этой связи замеры на значительной высоте не производились.

Маршрут экспедиционного обследования выбирался исходя из имеющихся данных по максимальному уровню радиоактивного загрязнения. Зафиксированная в 2 757 точках мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения не превысила 1,2 мкЗв/ч (при среднем значении 0,2–0,3 мкЗв/ч). Замеры на болотах не выявили следов ^{137}Cs на глубине более 40 см. Максимальная активность ^{137}Cs наблюдалась в верхнем

(0–4 см) слое почвы (до 65 %). С учетом полученных данных оценили возможность радиоактивного загрязнения в случае лесного пожара. Согласно расчетам в программной среде, радиоактивное загрязнение распространится на 348 га. Плотность радиоактивного загрязнения местности может вырасти на 5–10 % (от исходной). Пострадают 33 человека, есть угроза гибели 1 человека.

Установлено, что горящий торфяник — самый мощный и длительно действующий источник радиоактивного загрязнения, поэтому важно предупреждать торфяные и лесные пожары. Это позволит сократить перенос радионуклидов и выбросы радиоактивных дымов. Следует развивать дистанционные и надводные средства радиационного контроля.

Обсуждение и заключения. Зарегистрированная МАЭД не опасна для здоровья населения Брянской области. Однако частые возгорания существенно повышают вероятность переноса активного ^{137}Cs на жилые территории. В этом смысле актуален своевременный мониторинг и прогнозирование пожаров. Авторы сформулировали предложения по совершенствованию технической и технологической составляющих решения рассмотренной проблемы.

1. Для уточнения радиационной обстановки оборудовать автомобили повышенной проходимости:

- средствами регистрации радиационной обстановки;
- программно-аппаратным комплексом для автоматического сбора, анализа информации и ее фиксации

в базах данных.

2. Обеспечить надежную сотовую связь между всеми подразделениями оперативного реагирования в зоне чрезвычайной ситуации.

Дальнейшие исследования ориентированы на создание в зоне ЧС быстроразвертываемых модулей контроля радиационной обстановки и мобильных комплексов аэрогаммасъемки с применением беспилотников.

Ключевые слова: лесные пожары, торфяные пожары, радиоактивно загрязненная территория, авария на Чернобыльской АЭС, зоны радиоактивного загрязнения, радиационная разведка, радиационный контроль, радиационные риски для населения.

Благодарности. Авторы выражают признательность коллегам — А. В. Симонову, В. Н. Долгову, А. С. Клёмину, В. Ю. Яковлеву и А. М. Шведову за участие в организации и проведении экспедиционных обследований радиоактивно загрязненных территорий юго-западных районов Брянской области.

Для цитирования. Исследование влияния лесных и торфяных пожаров на радиационную обстановку в юго-западных районах Брянской области / О. Н. Апанасюк, С. Л. Гаврилов, С. А. Шикин, А. Е. Пименов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2023. — № 1. — С. 16–27. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-16-27>

© Апанасюк О. Н., Гаврилов С. Л., Шикин С. А., Пименов А. Е., 2023

Original article

Study of the Influence of Forest and Peat Fires on the Radiation Situation in the South-Western Regions of the Bryansk Region

Oleg N. Apanasyuk^{}, Sergey L. Gavrilov^{}, Sergey A. Shikin^{}, Artem E. Pimenov^{}

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ aon@ibrae.ac.ru

Abstract

Introduction. The paper considers the influence of radiation forest and peat fires on the spread of radioactive contamination, which affects the well-being of thousands of people. The state of the environment in vast territories is deteriorating; negative socio-economic processes are developing. This is a serious problem of two states: the Russian Federation and the Republic of Belarus. The objectives of the presented work are to study the radiation situation in forests and peat bogs located in the border areas of the Bryansk region, as well as to study the possibility of transferring radioactive materials during forest and peat fires.

Materials and Methods. The facts that clarified the theoretical basis of the presented research are highlighted in the scientific literature. The authors took into account, in particular, that:

- the activity of radionuclides in the soil decreases in direct proportion to the depth;
- a peat fire is an uncontrolled burning;
- emissions of caesium-137 fractions (^{137}Cs) during a fire can reach 3–4 %.

We know the areas of forests in radiation-contaminated territories (RCT) of the Bryansk region from the applied literature and official sources. The most problematic areas from this point of view have been identified.

A mobile radiometric laboratory, a scintillation gamma-ray spectrometer MKS-AT6101S were involved in the expedition research. The results of field gamma-ray spectrometry were recorded in three localities. The calculations for a hypothetical fire were carried out using the SAUR AIUS RSCHS 2030 software tool.

Results. The consequences of large and prolonged fires in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant are analyzed. It is established that the incidents did not lead to dangerous consequences for the population. The total effective dose of inhalations was ~ 0.003 % of the permissible level of irradiation. It is noted, however, that the forest soil of the Bryansk region has received significant damage from ^{137}Cs pollution. The density of such pollution exceeded 5 Ci/km^2 in 40 % of the affected forests. Of these, an indicator of $15\text{--}40 \text{ Ci/km}^2$ and more was recorded in 16 %, in some quarters — up to 200 Ci/km^2 . It is established that zones with a high contamination density (40 Ci/km^2) will remain in the region until 2026. Five districts are particularly problematic: Gordeevsky, Zlynkovsky, Klintsovsky, Krasnogorsky and Novozybkovsky.

When fixing and predicting harm, the authors of the presented work proceeded from the following fact: during fires, the combustion products (forest litter, grass and undergrowth) contain more radioactive substances than the crowns of trees. In this regard, measurements were not made at a significant height.

The field study route was chosen based on the available data on the maximum level of radioactive contamination. The ambient dose equivalent rate (ADER) of gamma radiation recorded at 2,757 points did not exceed $1.2 \mu\text{Sv/h}$ (with an average value of $0.2\text{--}0.3 \mu\text{Sv/h}$). Measurements in the marshes did not reveal traces of ^{137}Cs at a depth of more than 40 cm. The maximum activity of ^{137}Cs was observed in the upper (0–4 cm) soil layer (up to 65 %). Taking into account the data obtained, the possibility of radioactive contamination in the event of a forest fire was assessed. According to the calculations in the software environment, radioactive contamination will spread to 348 hectares. The density of radioactive contamination of the area may increase by 5–10 % (from the initial one). 33 people will suffer; there is a threat of death of 1 person.

It has been established that a burning peat bog is the most powerful and long-term source of radioactive contamination, therefore it is important to prevent peat and forest fires. This will reduce the transfer of radionuclides and emissions of radioactive fumes. Remote and surface radiation monitoring facilities should be developed.

Discussion and Conclusion. The registered ADER is not dangerous for the health of the population of the Bryansk region. However, frequent fires significantly increase the likelihood of transferring active ^{137}Cs to residential areas. In this sense, timely monitoring and forecasting of fires is relevant. The authors formulated proposals to improve the technical and technological components of the solution of the considered problem.

1. To clarify the radiation situation, all-terrain vehicles should be equipped with:

- means of registering the radiation situation;
- software and hardware complex for automatic collection, analysis of information and its fixation in databases.

2. There should be a reliable cellular communication between all rapid response units in the emergency zone.

Further research is focused on the creation of fast-deployable radiation monitoring modules and mobile aerial photography complexes using drones in the emergency zone.

Keywords: forest fires, peat fires, radioactively contaminated territory, Chernobyl accident, radioactive contamination zones, radiation survey, radiation control, radiation risks for the population.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to their colleagues — Simonov A. V., Dolgov V. N., Klemin A. S., Yakovlev V. Yu. and Shvedov A. M. for their direct participation in the organization and conduct of field studies of radioactively contaminated territories of the south-western regions of the Bryansk region.

For citation. Apanasyuk O. N., Gavrilov S. L., Shikin S. E., Pimenov A. E. Study of the Influence of Forest and Peat Fires on the Radiation Situation in the South-Western Regions of the Bryansk Region. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2023, no.1, pp. 16–27. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-16-27>

Введение. Данные научной и прикладной литературы позволяют составить представление о радиационной обстановке в лесах и на торфяниках, расположенных на радиоактивно загрязненных территориях (РЗТ) приграничных районов Брянской области. В ряде трудов изучено влияние на окружающую среду крупных лесных пожаров в зоне отчуждения (ЗО) Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС).

Из материалов Атласа последствий аварии на ЧАЭС¹ следует, что леса подверглись радиоактивному загрязнению на территории более 3 млн га в 15 субъектах Российской Федерации и шести областях Республики

¹ Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия — Беларусь) / Под ред. Ю. А. Израэля, И. М. Богдевича. Москва ; Минск, 2009. 140 с.

Беларусь. Авария на ЧАЭС стала причиной загрязнения радионуклидами более 1,5 млн га российских² и 292,1 тыс. га брянских лесов. Стоит уточнить, что последняя цифра — это около 30 % лесного фонда Брянской области.

Пожары в лесах и торфяниках на РЗТ повышают радиационные риски для населения прилегающих территорий, в том числе юго-западных районов Брянской области. Этим обусловлена актуальность рассматриваемой проблемы.

Цели научных изысканий: исследование радиационной обстановки в лесах и на торфяниках, расположенных в приграничных районах Брянской области, а также изучение возможности переноса радиоактивных материалов при лесных и торфяных пожарах.

Основные задачи:

- анализ содержания ^{137}Cs в лесных горючих материалах при возникновении пожаров;
- оценка опасности пожаров в лесах и на торфяниках с высокими уровнями радиоактивного загрязнения для здоровья населения, проживающего на РЗТ;
- подготовка предложений по совершенствованию технической и технологической составляющих решения исследуемой проблемы;
- определение направления дальнейших исследований в данной области.

Материалы и методы. Значительное число исследований посвящено оценке влияния на окружающую среду пожаров в лесах и на торфяниках РЗТ³ [3–12]. Ряд ученых отмечают, что на РЗТ переносчиком радионуклидов может быть дым лесных пожаров⁴ [1–9, 12].

Из [1] известно, что активность радионуклидов в почве снижается прямо пропорционально глубине. ^{137}Cs и трансурановые элементы большей частью сосредоточены в верхнем (0–5 см) слое. Здесь их содержание ^{137}Cs варьируется в диапазоне 41–76 %.

В [2] показано, что лесные и торфяные пожары представляют собой неконтролируемый процесс горения. Это бедствие для населения, экономики и природы. При тушении таких пожаров на РЗТ добавляется радиационный фактор.

В [3] отмечено, что выбросы фракций ^{137}Cs во время лесных пожаров могут достигать 3–4 %.

В [4] подчеркивается важность точного прогнозирования пожарных рисков для успешной стратегии тушения лесных пожаров. Предложено использовать программное обеспечение системы поддержки принятия решений. Данный софт состоит из модуля оценки пожарной опасности и модуля переноса радионуклидов при пожаре. Он позволяет работать с параметрами лесных пожаров на основе базы данных и прогнозировать экологические последствия лесных пожаров на РЗТ (количество выбросов радионуклидов, вторичное загрязнение территорий).

В экспедиционных исследованиях юго-западных районов Брянской области использовали передвижную радиометрическую лабораторию РЗТ. Данное оборудование позволило определить влияние лесных и торфяных пожаров на распространение радиоактивного загрязнения. Кроме того, оценивались радиационные риски для населения. В трех населенных пунктах регистрировали результаты полевой гамма-спектрометрии. В эксперименте задействовали сцинтилляционный гамма-спектрометр МКС-АТ6101С. Расчеты для гипотетического пожара выполнялись с помощью программного средства САУР АИУС РСЧС 2030⁵.

Результаты исследования

Анализ последствий крупных лесных пожаров в ЗО ЧАЭС. В апреле 2020 года вспыхнули масштабные лесные пожары в черныбыльской ЗО. Леса и луга интенсивно горели более двух недель [5]. С 6 по 26 апреля возгорания фиксировались в радиусе 25 км вокруг реактора [6].

3 апреля огонь охватил огромную площадь лесов вокруг ЗО [7] (рис. 1).

² 30 лет черныбыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России 1986–2016 : Российский национальный доклад / С. И. Воронов [и др.]. М., 2016. 202 с.

³ Кузьменкова Н. В., Рожкова А. К., Воробьева Т. А. Радиоэкологическая оценка воздействия торфяных пожаров на окружающую среду в зоне отселения Брянской области // Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-й годовщине аварии на ЧАЭС : мат-лы междунар. науч.-практ. конф. Обнинск. 2021. С. 190–193.

⁴ То же

⁵ Информационно-аналитическая система анализа и управления рисками автоматизированной информационно-управляющей системы Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (САУР АИУС РСЧС-2030) / ООО «ЦИЭКС» // <http://www.esrc.ru> : [сайт]. URL: http://www.esrc.ru/sites/default/files/contentuploads/docs/cieks_2020.pdf?ysclid=17q7p6c8cl443523486 (дата обращения: 06.09.2022).

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

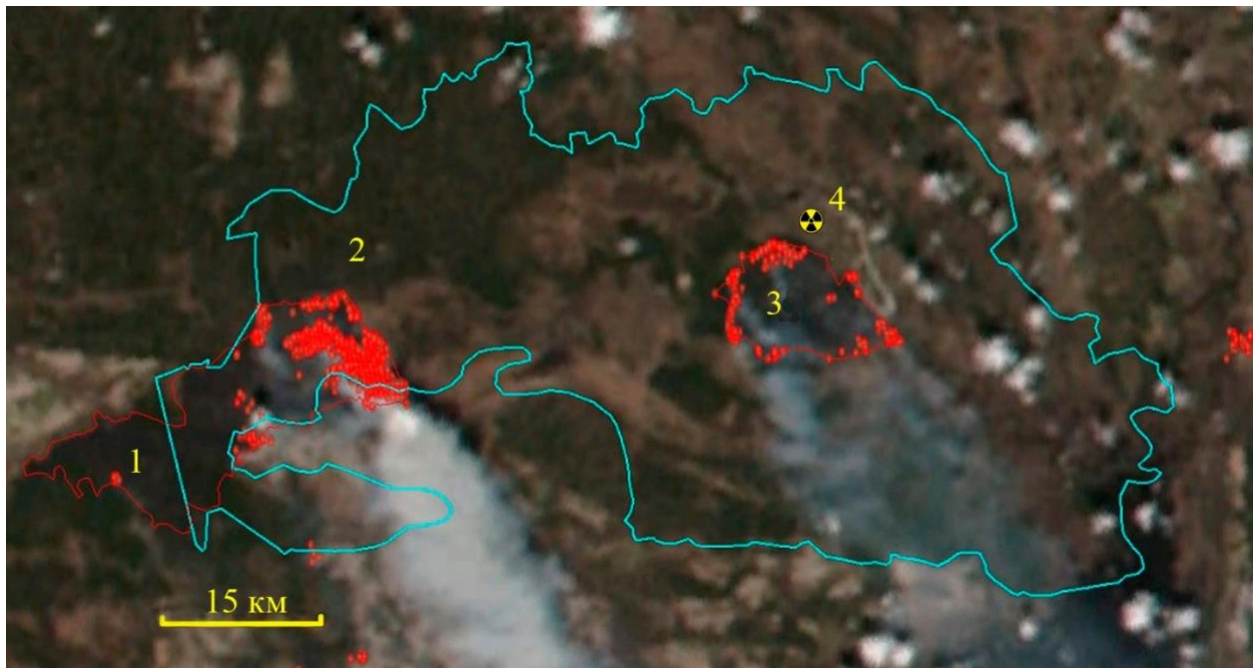


Рис. 1. Спутниковый снимок пожара в ЗО (апрель 2020 года): 1 — место возникновения пожара 3 апреля; 2, 3 — состояние на 8 апреля; 4 — месторасположение ЧАЭС, голубая линия — граница ЗО [7]⁶

Его удалось потушить только через 10 суток. Пожар, охвативший около 20 тыс. га, уничтожил значительный массив леса⁷.

В тушении приняли участие более 1 тыс. человек, 120 пожарных машин, вертолеты и самолеты. Для воздушной разведки задействовали 10 беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)⁸. Это позволило быстро оценить ситуацию и принять верные решения по развертыванию средств борьбы с огнем⁹.

Большинство публикаций в зарубежных научных журналах подтвердили отсутствие радиационной опасности для населения. Об этом же говорилось в заявлении Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ)¹⁰. Полученная от пожаров в ЗО суммарная эффективная доза ингаляций составила ~0,003 % от допустимого уровня облучения населения (1 мЗв/год) [5].

После чернобыльской аварии в 1986 году первые значимые лесные пожары в ЗО датируются августом 1992 года. Они затронули 1 тыс. га лугов и лесных угодий, верховой пожар охватил более 5 тыс. га [7]. При низовых пожарах не наблюдалось заметное (более 1 км) продвижение радиоактивного загрязнения, даже по ходу распространения дыма. Продукты горения от верхового пожара при сильном ветре переносятся намного дальше, но они имеют меньшую радиоактивность, так как кроны деревьев загрязнены намного меньше, чем лесная подстилка, трава и подлесок [7].

В 1994 году на западной территории Рыжего леса в ЗО измеряли содержание ¹³⁷Cs в разных уровнях соснового леса: от хвои до почвы на глубине 15 см (рис. 2 [7, 8]).

⁶ Квітневі лісові пожежі 2020 року в зоні відчуження Чорнобильської АЕС стали найбільшими в історії / Лісівник // for-ester.blogspot.com : [сайт]. URL: https://for-ester.blogspot.com/2020/04/2020_10.html (дата обращения: 06.09.2022).

⁷ Сивков П. Экологи заявили о вторичном радиоактивном загрязнении из-за лесных пожаров в зоне ЧАЭС / ТАСС : [сайт]. URL: <https://tass.ru/obschestvo/10583913> (дата обращения : 06.09.2022).

⁸ Воздушный кодекс Российской Федерации от 19 марта 1997 г. № 60-ФЗ / Государственная Дума ; Совет Федерации // ivo.garant.ru : [сайт]. URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/10200300/paragraph/319340:1> (дата обращения : 08.10.2022).

⁹ Peng H. Chernobyl: Massive Wildfire Extinguished with the Help of Drones // DJI Enterprise : [сайт]. URL: <https://enterprise-insights.dji.com/user-stories/chernobyl-wildfire-extinguished-with-drones> (дата обращения: 27.08.2022).

¹⁰ МАГАТЭ не видит радиационных рисков в связи с пожарами в чернобыльской зоне отчуждения / Международное агентство по атомной энергии // iaea.org : [сайт]. <https://www.iaea.org/ru/newscenter/pressreleases/magate-ne-vidit-radiacionnyh-riskov-v-svyazi-s-pozharami-v-chernobylskoy-zone-otchuzhdeniya> (дата обращения: 06.09.2022). <https://www.bps-journal.ru>

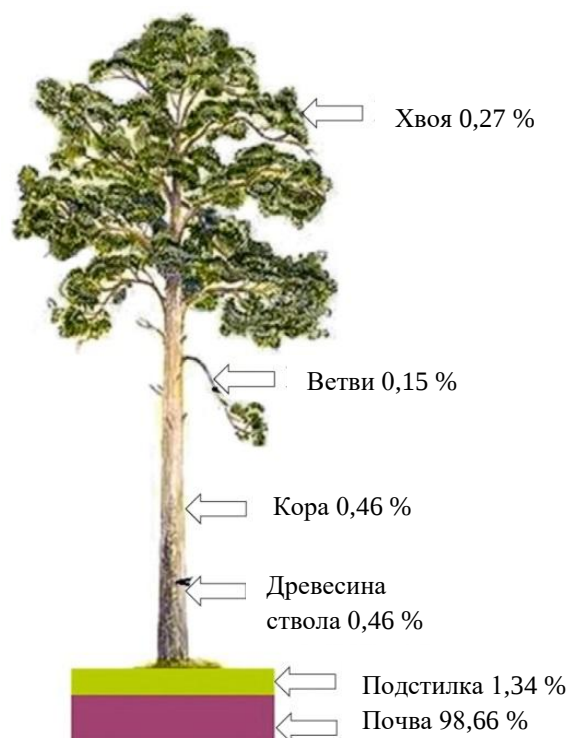


Рис. 2. Распределение ^{137}Cs в частях сосны и почве. Пробы взяты в ЗО (10 и 20 км к югу от ЧАЭС) [7]

Для ликвидаторов наиболее радиационно опасны низовые лесные пожары ЗО ЧАЭС, т. к. субмикронные аэрозоли, содержащие ^{137}Cs , долго остаются в атмосфере и могут переносить его на значительные расстояния. 10-кратное снижение концентрации радиоактивных аэрозолей в дымовом шлейфе наблюдалось на расстоянии более 2 км от фронта пожара [8].

С. И. Воронов с соавторами выяснил, что леса Брянской области существенно загрязнены ^{137}Cs . При этом более 40 % пострадавших лесов относятся к зоне радиационного загрязнения (ЗРЗ) с плотностью радиоактивного загрязнения почвы ^{137}Cs более 5 Ки/км². Из них на 16 % зафиксирован показатель 15–40 Ки/км² и больше, в отдельных кварталах — до 200 Ки/км².

В юго-западных районах Брянской области преобладают леса 1–3-го классов (по классификации природной пожарной опасности¹¹) [9].

В соответствии с законом¹², с 1991 года на территории Брянской области установлено четыре типа зон по опасности радиации:

- зона отчуждения (ЗОТЧ);
- зона отселения (ЗОТС);
- зона проживания с правом на отселение (ЗПО);
- зона проживания с льготным социально-экономическим статусом (ЗЛС).

ЗОТЧ характеризуется плотностью радиоактивного загрязнения ^{137}Cs более 40 Ки/км², ЗОТС — более 15 Ки/км², ЗПО — от 5 до 15 Ки/км², ЗЛС — от 1 до 5 Ки/км².

По данным Российского национального доклада, в 2020 году на РЗТ Брянской области площади лесов составили 226,9 тыс. га, в том числе:

- ЗЛС — 127 тыс. га;
- ЗПО — 84,2 тыс. га;
- ЗОТС — 14,9 тыс. га;
- ЗОТЧ — 0,8 тыс. га [10].

На рис. 3 представлен прогноз загрязнения ^{137}Cs территории Брянской области к 2026 году.

¹¹ Классификация природной пожарной опасности лесов и классификация пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды / Федеральное агентство лесного хозяйства // ivo.garant.ru: [сайт]. URL: <http://ivo.garant.ru/#/document/12189021/paragraph/9:0> (дата обращения: 06.09.2022).

¹² О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС : Закон РСФСР от 15.05.1991 № 1244-1 / Верховный Совет РСФСР // garant.ru: [сайт]. URL: <https://base.garant.ru/185213/> (дата обращения: 06.09.2022).

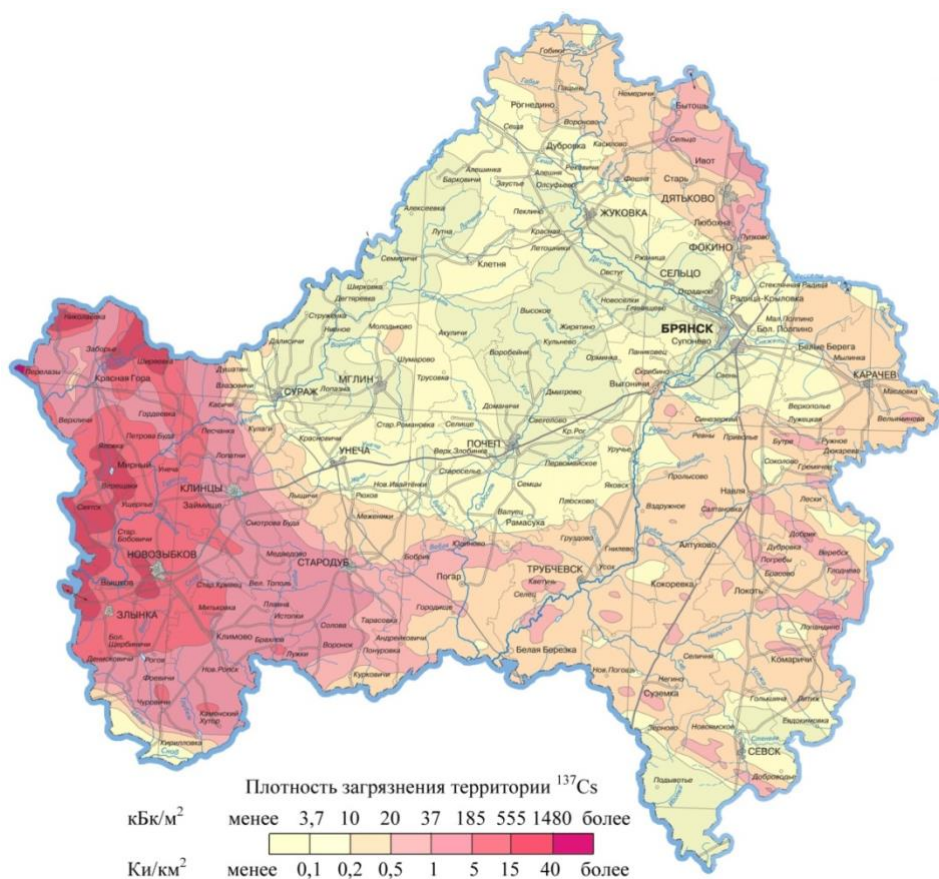


Рис. 3. Карта загрязнения ^{137}Cs территории Брянской области согласно Атласу последствий аварии на ЧАЭС (прогноз на 2026 год)

Наиболее радиоактивно загрязненные районы: Гордеевский, Злынковский, Клиновский, Красногорский и Новозыбковский — расположены в ЗРЗ Брянской области и в общей сложности занимают 14,3 % территории региона. На этой площади находятся 329 населенных пунктов (рис. 4) [11].

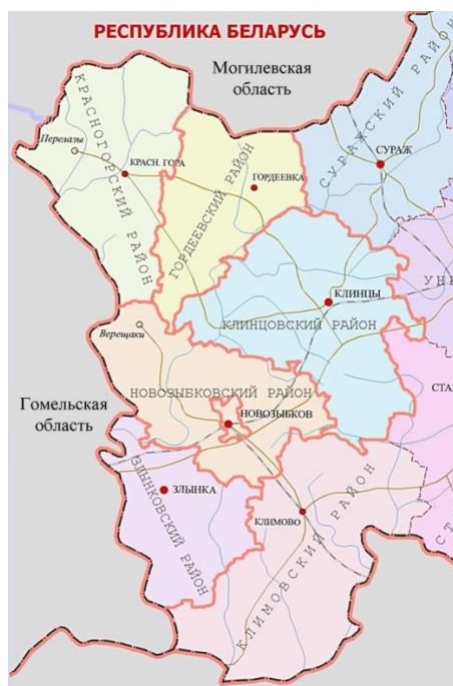


Рис. 4. Юго-запад Брянской области. Административные муниципальные образования на РЗТ¹³

¹³ Районы Брянской области на карте с границами // maps-rf.ru : [сайт]. URL: <https://maps-rf.ru/brianskaja-oblast/rajony.php?ysclid=l5p8uis5n9622087709> (дата обращения: 06.09.2022). <https://www.bps-journal.ru>

В [9] представлен аналогичный прогноз на 2046 год. Данные касаются четырех ЗРЗ наиболее загрязненных участков Брянской области. Измерялось содержание ^{137}Cs в лесной подстилке. Исследователи подтвердили значительное загрязнение, особенно в Красногорском районе и Новозыбковском городском округе. Точные цифры приводятся ниже.

- Гордеевский р-н: ЗЛС — 3,932 кБк/кг; ЗПО — 9,43 кБк/кг; ЗОТС — 18,1 кБк/кг.
- Злынковский р-н: ЗЛС — 4,24 кБк/кг; ЗПО — 8,67 кБк/кг.
- Красногорский р-н: ЗЛС — 3,1 кБк/кг; ЗПО — 9,25 кБк/кг; ЗОТС — 26,6 кБк/кг; ЗОТЧ — 81,49.
- Новозыбковский городской округ: ЗЛС — 4,58 кБк/кг; ЗПО — 9,34 кБк/кг; ЗОТС — 21,48 кБк/кг.

Отметим, что одна из причин торфяных пожаров — заболачивание РЗТ Брянской области.

По официальным данным¹⁴, в пожароопасном сезоне 2020 года в Брянской области зарегистрировано 175 лесных пожаров на общей площади 1351,49 га. На территории Брянской области учтено 1449 торфяных болот площадью 77,2 тыс. га. Почти 90 % болот занимают площади до 100 га, 11 — более 1 тыс. га. Самые крупные расположены в пойме р. Нерусса (7 462 га, Брасовский р-н) и Кожановском (6 984 га, Красногорский район).

В¹⁵ отмечено, что при торфяном пожаре аэрозоли, содержащие ^{137}Cs , не распространяются далее 500 м от очага возгорания, поэтому не представляют опасности для жителей близлежащих населенных пунктов. Однако результаты работы [12] свидетельствуют о том, что горящий торфяник — самый мощный и длительно действующий источник радиоактивного загрязнения. Поэтому важно предупреждать торфяные и лесные пожары. Это позволит сократить перенос радионуклидов и выбросы радиоактивных дымов.

Экспедиционные обследования радиоактивно загрязненных территорий юго-западных районов Брянской области. В 2019 году проводились экспедиционные обследования в лесах и на торфяниках приграничных территорий Брянской области. Изучалось влияние лесных и торфяных пожаров на здоровье населения РЗТ. Замеры выполняли с помощью передвижной радиометрической лаборатории (ПРЛ)¹⁶.

Маршрут обследований (рис. 5) выбирался исходя из данных о максимальном уровне радиоактивного загрязнения.

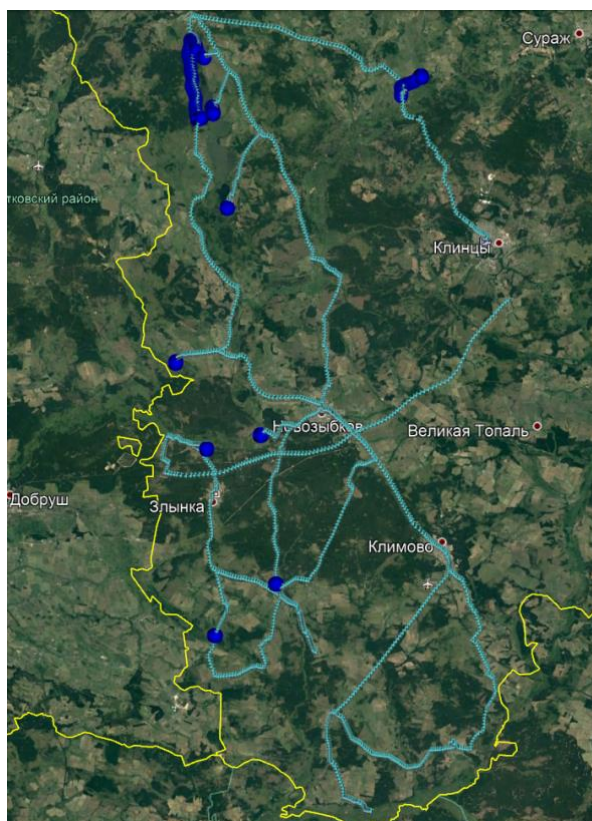


Рис. 5. Карта маршрута радиационного обследования

¹⁴ Цублова Е. Г., Лукашов С. В. Природные ресурсы и окружающая среда Брянской области. Годовой доклад об экологической ситуации в Брянской области в 2020 г. Брянск, 2021. С. 251. URL: http://www.kpl32.ru/in_doc/20210616_21856_gosdoklad_2020.pdf (дата обращения: 06.09.2022).

¹⁵ Кузьменкова Н. В., Рожкова А. К., Воробьева Т. А. Радиоэкологическая оценка воздействия торфяных пожаров на окружающую среду в зоне отселения Брянской области

¹⁶ Проектирование автоматизированной системы мониторинга чрезвычайных ситуаций с радиационным фактором на радиоактивно загрязненных вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС территориях государств — участников Союзного государства (АС КРО): отчет о НИР / АНО ЦАБ ИБРАЭ РАН; рук. С. Л. Гаврилов. М., 2019, 380 с. № ГР АААА-Б20-220013090244-3.

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

Во время движения ПРЛ по районам, наиболее загрязненным радионуклидами, установка «Гамма-сенсор» вела непрерывную гамма-съемку. Измерялась мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения. Замеры выполнены в 2 757 точках.

Для обнаружения источников ионизирующего излучения с идентификацией радионуклидов использовался спектрометр МКС-АТ6101С, а для подтверждения данных радиационной обстановки — дозиметр-радиометр ДКС-96.

Во всех точках полевых измерений МАЭД гамма-излучения не превышала 1,2 мкЗв/ч (при среднем значении 0,2–0,3 мкЗв/ч). Это согласуется с данными Атласа последствий аварии на ЧАЭС (0,1–0,3 мкЗв/ч).

Для замеров на болотах Кожановское, Белимово, Чайное и Оболёшево задействовали установку Becquerel Monitor LB 200 производства Berthold technologies. Полевые измерения не выявили следов ^{137}Cs на глубине более 40 см.

Наибольшая активность ^{137}Cs наблюдалась в верхнем (0–4 см) слое почвы (до 65 %). Это согласуется с результатами, полученными белорусскими учеными (41–76 % [1]).

Для уточнения радиационной обстановки в юго-западных районах Брянской области методом полевой гамма-спектрометрии провели радиационные обследования в трех районах со средним уровнем МАЭД более 0,6 мкЗв/ч (Новозыбковский, Злынковский и Красногорский). Результаты сведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты полевой гамма-спектрометрии, ^{137}Cs

Точка измерения (населенный пункт)	Измеренное значение		Данные Атласа последствий аварии на ЧАЭС, кБк/м ² (Ки/км ²)
	Бк/см ²	кБк/м ²	
с. Перевоз (Новозыбковский р-н)	45,7	457	555–1480 (15–40)
пгт Вышков (Злынковский р-н)	96,8	968	555–1480 (15–40)
с. Великоудёбное (Красногорский р-н)	32,2	322	185–555 (5–15)

В эксперименте использовался сцинтилляционный гамма-спектрометр МКС-АТ6101С. Аппарат устанавливали на треногу таким образом, чтобы между поверхностью земли и центром регистрации кристалла сцинтиллятора было расстояние 1 метр. Для учета распределения активности по глубине при расчетах поверхностной активности в месте проведения измерений отбирали несколько кернов грунта. Полученные результаты сопоставимы с данными Атласа последствий аварии на ЧАЭС.

Оценка возможного радиоактивного загрязнения при лесном пожаре. С учетом данных об активности ^{137}Cs на РЗТ Брянской области рассматривалась возможность потенциального радиоактивного загрязнения в случае лесного пожара. Для оценочного расчета выбрали точку возгорания в лесу в районе пгт Вышков (географические координаты 52°28'45"N, 31°42'39"E).

В качестве граничных условий установили следующие параметры:

– характеристики лесного пожара (тип пожара — низовой, класс горимости леса — лиственный лес, продолжительность пожара — 24 часа, класс пожарной опасности погоды — V, т. е. чрезвычайная пожарная опасность);

– метеоусловия на момент возникновения лесного пожара (направление ветра — 90° — по азимуту; скорость — 10 м/с).

Выполнен расчет в программной среде САУР АИУС РСЧС 2030 для гипотетически произошедшего лесного пожара 14.11.2019 00:00. На условную дату 15.11.2019 и время 00:00 получены следующие результаты:

- площадь выгоревшего леса — 3,7 га;
- периметр пожара — 0,7 км;
- площадь зоны задымления — 1 437,6 га;
- площадь зоны радиоактивного загрязнения — 348,0 га;
- количество людей, пострадавших в результате пожара, — 33 человека;
- число жертв — до 1 человека.

В результате такого пожара плотность радиоактивного загрязнения местности может вырасти на 5–10 % (от исходной). Увеличение дозовой нагрузки при данном одиночном случае не приведет к значимым последствиям для населения. Однако череда пожаров потенциально опасна. Она может ухудшить ситуацию на приграничных территориях с фоновым загрязнением.

Во время экспедиции выяснилось, что водные преграды (реки, озера) на РЗТ Брянской области затрудняют доступ наземных мобильных средств радиационного контроля к лесам прибрежной полосы. В этом случае наиболее эффективны:

- дистанционные средства радиационного контроля на базе БПЛА (обнаружение очагов возгорания)¹⁷ [13];
- надводные средства радиационного контроля (радиационная разведка и уточнение данных радиационного контроля).

Беспилотные летательные аппараты — обязательный инструмент в борьбе с лесными пожарами. Особенно важны тепловизионные изображения, так как они передают вид местности с высоты птичьего полета и помогают определить направление распространения огня. Это позволяет пожарным оперативно принимать решение о том, куда должны двигаться экипажи и кого следует эвакуировать.

Обсуждение и заключения. Итоги научных и экспедиционных изысканий позволяют сделать ряд утверждений. В очаге пожара на радиационно загрязненной территории содержание радиоактивных аэрозолей в дымовом шлейфе может на порядки превышать допустимые значения, поэтому пожарные рискуют получить недопустимо высокую ингаляционную дозу облучения.

Отметим, что радиационная обстановка в лесах РЗТ Брянской области изменяется крайне медленно. Наиболее опасна лесная подстилка. На нее приходится более 70 % общего запаса ¹³⁷Cs в лесных горючих материалах. ¹³⁷Cs активен в лесной подстилке и в верхнем слое (до 40 см) торфяников, поэтому лесные и торфяные пожары создают риск переноса радионуклидов в близлежащие населенные пункты. Такая угроза сохранится в ближайшие годы.

Экспедиционные обследования с ПРЛ показали, что во всех точках полевых измерений МАЭД не превышает 1,2 мкЗв/ч. Средняя МАЭД (0,2–0,3 мкЗв/ч) соответствует данным Атласа последствий аварии на ЧАЭС. Такая доза не опасна для здоровья населения РЗТ Брянской области. Тем не менее частые возгорания существенно повышают вероятность переноса активного ¹³⁷Cs на жилые территории. В этом смысле актуален своевременный мониторинг и прогнозирование пожаров.

Авторы сформулировали предложения по совершенствованию технической и технологической составляющих решения рассмотренной проблемы.

1. Для уточнения радиационной обстановки необходимо использовать автомобили повышенной проходимости. Их следует оборудовать:

- средствами регистрации радиационной обстановки;
- программно-аппаратным комплексом для автоматического сбора, анализа информации и ее фиксации в базы данных.

Это позволит при крупном пожаре оперативно уточнить радиационную обстановку. Прогностические модели и электронные базы данных радиоактивного загрязнения дают возможность оптимизировать маршруты спецтехники. Такая навигация будет базироваться на результатах прошлых измерений активности ¹³⁷Cs и актуальных данных, уточненных по итогам текущего маршрута.

2. Обеспечить надежную сотовую связь между всеми подразделениями оперативного реагирования в зоне чрезвычайной ситуации.

Дальнейшие исследования ориентированы на создание быстроразвертываемых модулей контроля радиационной обстановки и мобильных комплексов аэрогаммасъемки с применением БПЛА в зоне ЧС. Новое измерительное оборудование и программное обеспечение позволят определять в реальном масштабе времени характеристики радиационных полей с геопривязкой.

Список литературы

1. Potential threat to human health during forest fires in the Belarusian exclusion zone / A. A. Dvornik, A. M. Dvornik, R. A. Korol [et al.] // *Aerosol Science and Technology*. — 2018. — Vol. 52, iss. 8. — P. 923–932. <https://doi.org/10.1080/02786826.2018.1482408>
2. Сарасеко, Е. Г. Ликвидация лесных пожаров на почвах различных типов / Е. Г. Сарасеко, В. Ф. Тимошков, Е. И. Дегтярева // *Вестник Могилевского государственного университета им. А. А. Куляшова. Серия В. Естественные науки: математика, физика, биология* — 2020. — № 2 (56). — С. 86–98.
3. Formation of Radioactive Aerosol Particles During the Wildland Fires in Chernobyl Zone and their Radioecological Impact / Y. Yoschenko, V. Kashparov, S. Levchuk [et al.] // *Radioactive Particles in the Environment*. — 2009. — P. 69–89. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2949-2_4

¹⁷ Воронов С. И. Комплексная система мониторинга за состоянием защиты населения на радиоактивно загрязненных территориях // *Радиоэкологические последствия радиационных аварий: к 35-й годовщине аварии на ЧАЭС : мат-лы междунар. науч.-практ. конф.* Обнинск, 2021. С. 175–177. <https://www.bps-journal.ru>

4. Mapping of forest fire hazard depending on weather conditions using geoinformation technologies / A. A. Dvornik, A. M. Dvornik, R. S. Kurilenko [et al.] // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series. — 2021. — Vol. 66, No. 3. — P. 320–332. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2021-66-3-320-332>
5. Simulation study of radionuclide atmospheric transport after wildland fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020 / M. Talerko, I. Kovalets, T. Lev. [et al.] // Atmospheric Pollution Research. — 2021. — Vol. 12 (79), iss. 3. — P. 193–204. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.010>
6. The assessment of the April 2020 Chernobyl wildfires and their impact on ^{137}Cs levels in Belgium and The Netherlands / P. De Meutter, Ch. Gueibe, J. Tomas [et al.] // Journal of Environmental Radioactivity. — 2021. — Vol. 237. — Art. 06688. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106688>
7. Боровой, А. А. Чернобыль. Опасность лесных пожаров / А. А. Боровой, С. Л. Гаврилов, В. А. Хвощинский // Пожарная безопасность. — 2022. — № 3 (108). — С. 37–43. <https://doi.org/10.37657/vniipo.pb.2022.65.89.003>
8. Пазухин, Э. М. Лесной пожар как фактор перераспределения радионуклидов чернобыльского генезиса в окружающей среде / Э. М. Пазухин, А. А. Боровой, Б. И. Огородников // Радиохимия. — 2004. — Т. 46, № 1. — С. 93–96.
9. Марченко, Т. А. Ретроспективное и современное состояние лесных территорий приграничных районов Брянской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению / Т. А. Марченко, А. И. Радин, А. Н. Раздайковин // Радиационная гигиена. — 2020. — Т. 13, № 2. — С. 6–18. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-2-6-18>
10. Российский национальный доклад: 35 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. 1986–2021 / Под общ. ред. Л. А. Большова. — Москва : Академ-Принт, 2021. — 104 с.
11. Скоробогатов, А. М. Влияние режима зон радиоактивного загрязнения на состояние муниципальных образований (на примере Брянской области) / А. М. Скоробогатов, О. Н. Апанасюк, Т. А. Буланцева // Региональные исследования. — 2021. — № 4 (74). — С. 89–103. <https://doi.org/10.5922/1994-5280-2021-4-7>
12. Dusha-Gudym, S. I. Transport of radioactive materials by wildland fires in the Chernobyl accident zone: how to address the problem / S. I. Dusha-Gudym // International forest fire news. — 2005. — № 32. — P. 119–125.
13. Гаврилов, С. Л. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов для проведения аэрогаммасъемки территорий / С. Л. Гаврилов, А. Е. Пименов, А. М. Шведов [и др.] // Аппаратура и новости радиационных измерений. — 2022. — № 3 (110). — С. 3–11. <https://doi.org/10.37414/2075-1338-2022-110-3-3-11>

Поступила в редакцию 10.12.2022.

Поступила после рецензирования 29.12.2022.

Принята к публикации 16.01.2023.

Об авторах

Апанасюк Олег Николаевич, заведующий лабораторией развития целевых программ комплексной безопасности и защиты населения, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (115191, РФ, г. Москва, ул. Большая Тульская, 52), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9152-1000), aon@ibrae.ac.ru

Гаврилов Сергей Львович, заведующий отделением научно-технических проблем развития комплексных систем, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (115191, РФ, г. Москва, ул. Большая Тульская, 52), [ORCID](https://orcid.org/0000-0002-1000-1000), gav@ibrae.ac.ru

Шикин Сергей Александрович, заведующий отделом разработки и развития комплексных систем радиационного мониторинга, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (115191, РФ, г. Москва, ул. Большая Тульская, 52), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9152-1000), shickin@ibrae.ac.ru

Пименов Артем Евгеньевич, заведующий лабораторией перспективных методов мониторинга радиационной обстановки, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (115191, РФ, г. Москва, ул. Большая Тульская, 52), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9152-1000), artisl@ibrae.ac.ru

Заявленный вклад авторов

О. Н. Апанасюк — формирование основной концепции, обобщение и анализ результатов исследований, подготовка текста, формулирование выводов. С. Л. Гаврилов — научное руководство, проведение экспедиционных обследований и расчетов, доработка текста, корректировка выводов. С. А. Шикин — проведение экспедиционных обследований, анализ результатов, доработка текста. А. Е. Пименов — проведение экспедиционных обследований, анализ результатов, доработка текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



Научная статья

УДК 621.9.06:628.5

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-28-38>

Снижение виброакустической активности плавучих средств при использовании вибродемпфирующих материалов

 А. В. Будовский , Ю. И. Булыгин , А. В. Павликов , А. В. Трюхан 

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

✉ k55355396@gmail.com

Аннотация

Введение. Электрические машины, дизельные установки, насосные агрегаты и вентиляторы, а также рабочие органы земснарядов (трубопроводы, черпаки, рыхлители и т. д.) являются основными источниками шума и вибрации на плавучих средствах. Причем главными вредными факторами при эксплуатации плавучих кранов и земснарядов выступают как сама вибрация, так и сопутствующие ей явления инфразвука и структурного шума. Одной из наиболее актуальных задач по внедрению на плавучих средствах методов техносферной безопасности является снижение вредного воздействия на здоровье персонала виброакустических факторов. Цель представленного исследования — улучшение условий труда машинистов плавучих средств за счет внедрения предложенной авторами методики проектирования систем виброзащиты, учитывающей как внешние факторы (температура среды), так и динамические характеристики вибродемпфирующих материалов. Показана возможность выбора наиболее рационального вибродемпфирующего материала на основе инженерного расчёта требуемой виброизоляции.

Материалы и методы. Применен пассивный метод борьбы с вибрацией, при котором в конструкции плавучего средства используются элементы упругости и вибродемпфирующий материал. Идентифицированы источники шума и вибрации, а также определены их фактические уровни воздействия. Выполнен анализ динамических характеристик и свойств вибродемпфирующих материалов, выявлены факторы, оказывающие влияние на эффективность вибродемпфирования.

Результаты исследования. Разработана расчетная схема модели виброгашения на рабочем месте машиниста плавучего средства. Создана аналитическая база динамических характеристик и свойств вибродемпфирующих материалов. К плавучим средствам адаптирована инженерная методика расчета эффективности виброизоляции. Выполнены расчеты эффективности виброизоляции при использовании различных вибродемпфирующих материалов разной толщины, на основании которых доказаны преимущества виброгасящего настила из эластомерной пластины ВЭП20.

Обсуждение и заключения. Разработанная в Excel инженерная методика расчета эффективности виброизоляции автоматизирована и имеет удобный интерфейс. Это позволяет осуществлять расчет и обоснованный подбор многослойных конструкций с учетом температуры внешней среды, а также динамических характеристик вибродемпфирующих материалов в зависимости от спектра шума и вибрации. Полученные результаты можно использовать при проектировании систем виброзащиты машинистов плавучих средств.

Ключевые слова: вибродемпфирующие материалы, виброгашение, плавучие средства, земснаряды, виброакустический фактор, коэффициент потерь.

Для цитирования. Снижение виброакустической активности плавучих средств при использовании вибродемпфирующих материалов / А. В. Будовский, Ю. И. Булыгин, А. В. Павликов, А. В. Трюхан // Безопасность техногенных и природных систем. — 2023. — № 1. — С. 28–38. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-28-38>

©Будовский А. В., Булыгин Ю. И., Павликов А. В., Трюхан А. В., 2023

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

Reduction of Watercrafts Vibroacoustic Activity by Vibration Damping Materials

Aleksandr V. Budovskiy  , Yuriy I. Bulygin , Aleksandr V. Pavlikov , Aleksandr V. Tryukhan 

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract

Introduction. Electric machines, diesel installations, pumping units and fans, as well as working bodies of dredgers (pipelines, scoops, rippers, etc.) are the main sources of noise and vibration on watercrafts. Moreover, the main harmful factors in the operation of floating cranes and dredgers are both the vibration itself and the accompanying phenomena of infrasound and structural noise. One of the most urgent tasks for the introduction of technosphere safety methods on watercrafts is to reduce the harmful effects of vibroacoustic factors on the health of personnel. The research objective is to improve the working conditions of watercrafts drivers by introducing the method of designing vibration protection systems proposed by the authors, taking into account both the external factors (ambient temperature) and the dynamic characteristics of vibration damping materials. The possibility of choosing the most rational vibration damping material based on the engineering calculation of the required vibration insulation is shown.

Materials and Methods. A passive method of vibration control has been applied, in which elastic elements and vibration damping material are used in the watercraft design. The sources of noise and vibration have been identified, and their actual exposure levels have been determined. The analysis of dynamic characteristics and properties of vibration damping materials is carried out. The factors influencing the efficiency of vibration damping are revealed.

Results. A design scheme of the vibration damping model at the workplace of the watercraft driver has been developed. An analytical database of dynamic characteristics and properties of vibration damping materials has been created. An engineering method for calculating the effectiveness of vibration insulation has been adapted to watercrafts. The calculations of the effectiveness of vibration insulation using various vibration damping materials of different thicknesses have been performed, on the basis of which the advantages of vibration damping flooring made of elastomeric plate VEP20 have been proved.

Discussion and Conclusion. The engineering methodology developed in Excel for calculating the effectiveness of vibration insulation is automated and has a user-friendly interface. This allows you to calculate and reasonably select multilayer structures taking into account the ambient temperature, as well as the dynamic characteristics of vibration damping materials depending on the spectrum of noise and vibration. The results obtained can be used in the design of vibration protection systems for watercraft drivers.

Keywords: vibration damping materials, vibration damping, watercrafts, dredgers, vibration acoustic factor, loss coefficient.

For citation. A. V. Budovskiy, Yu. I. Bulygin, A. V. Pavlikov, A. V. Tryukhan. Reduction of Watercrafts Vibroacoustic Activity by Vibration Damping Materials. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2023, no.1, pp. 28–38. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-28-38>

Введение. Сложность определения оптимального уровня виброизоляции связана с идентификацией источников виброакустической активности и зависит от конструктивных особенностей плавучего средства. Кроме того, эффективность виброизоляции зависит и от динамических свойств самих виброгасящих материалов. В свою очередь, на динамические характеристики вибродемпфирующих материалов влияют условия внешней среды (температура) и спектры колебаний.

Чтобы уменьшить виброакустическую активность плавучих средств, необходимо решить комплекс взаимосвязанных задач:

- установить основные источники шума и вибрации, а также их фактические уровни воздействия;
- разработать модели виброгашения и расчетные схемы для системы виброзащиты машиниста плавучего средства на рабочем месте;
- провести аналитический обзор научных исследований по поводу определения динамических характеристик материалов, оказывающих влияние на эффективность вибродемпфирования;
- определить точные динамические характеристики вибродемпфирующих материалов, в том числе коэффициент потерь колебательной энергии с учетом спектра колебаний и температуры¹.

Решение вышеперечисленных задач позволит предложить обоснованную методику инженерного расчета виброизоляции на основе виброгасящих материалов с учетом специфики объекта исследования.

¹Авдонин В. В. Вибропоглощающие композиционные покрытия: дис. ... канд. техн. наук. Саранск, 2015. 123 с.
<https://www.bps-journal.ru>

Материалы и методы. Для снижения уровней вибрации использовались методы виброакустической защиты машиниста плавучего средства, они заключались в применении упругодемпфирующего элемента в разрабатываемой конструкции.

В качестве объекта исследования выбран земснаряд для производства добычных работ — плавучая землесосная установка ПЗУ-8М (рис. 1). Она используется КТ «Крым-Инвестстрой и Компания» при разработке Сасыкского месторождения песчано-гравийной смеси в реке Крым. В машинах такого типа источником шума и вибрации является оборудование, монтируемое на понтонах (рис. 1).

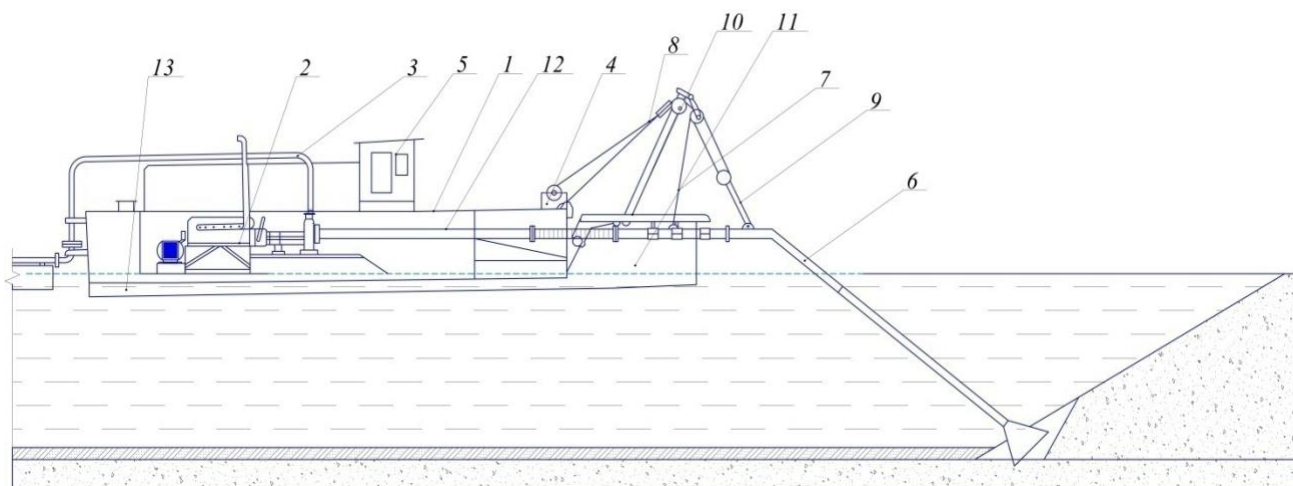


Рис. 1. Схема плавучей землесосной установки ПЗУ-8М: 1 — корпус; 2 — двигатель ЗД6СН; 3 — напорный пульпопровод; 4 — лебедка подъема рамы рыхлителя; 5 — рубка управления; 6 — всасывающий патрубок; 7 — укосина; 8 — подвеска укосины; 9 — полиспаст подвески рамы всасывающего патрубка; 10 — подъемная рама рыхлителя; 11 — понтон боковой; 12 — напорный трубопровод; 13 — понтон центральный

Существует проблема получения достоверной информации об уровнях шума и вибрации на данном оборудовании. Зачастую эти данные могут присутствовать в протоколах результатов специальной оценки условий труда (СОУТ) либо в специальной литературе (руководящий документ, ГОСТ), а также в научно-технической литературе (диссертации, статьи, отчеты)² [1, 2]. Однако степень их достоверности различна, что обуславливает необходимость планирования и проведения измерений шума и вибрации непосредственно на объекте.

Так, например, фактические уровни шума дизель-насоса ЗД6СН, установленного на платформе земснаряда ПЗУ-8М, приводятся в руководящем документе³ и представлены на рис. 2.

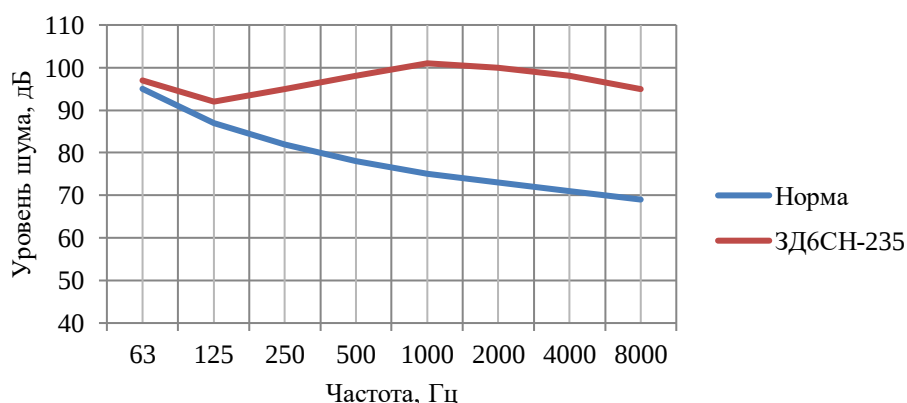


Рис. 2. Сравнение фактического уровня звукового давления дизель-насоса ЗД6СН с санитарно-гигиенической нормой⁴

²Щербакова О. В. Виброизоляция структурного шума на судах: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2014. 20 с.

³РД 31.81.81-90. Рекомендации по снижению шума на судах морского флота. Утверждены решением Минморфлота 04.04.1991. Ленинград, 1991. 67 с.

⁴Об утверждении Методики проведения специальной оценки условий труда, Классификатора вредных и (или) опасных производственных факторов, формы отчета о проведении специальной оценки условий труда и инструкции по ее заполнению: приказ Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 января 2014 года № 33н / Гарант: [сайт]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_158398/ (дата обращения: 15.02.2023).

Судя по данным на рис. 2, требуемая шумоизоляция достигает 26 дБ при частоте 1000 Гц, что является одной из причин высоких уровней шума и вибрации, передаваемых от дизель-насоса в рубку машиниста.

В рассматриваемом случае КТ «Крым-Инвестстрой и Компания» предоставила авторам протоколы с результатами измерений на рабочих местах уровней звукового давления и виброускорения, которые были получены в рамках проведенной в организации СОУТ в марте-апреле 2017 года. Поскольку в протоколах измерений представлены эквивалентные уровни шума, измеренные в соответствии с методикой трижды, необходимо разложить уровень звукового давления в спектр по Осипову⁵ для получения полной спектральной характеристики шума.

В результате анализа данных протокола по уровням шума и вибрации получены спектральные характеристики шума (рис. 3). Эти значения фактических уровней звукового давления на рабочих местах машиниста и помощника машиниста земснаряда ПЗУ-8М позволили выявить превышение санитарно-гигиенических норм, которое соответствовало вредному классу условий труда 3.2. Фактические значения параметра вибрации, в свою очередь, соответствовали классу условий труда 3.1, было установлено также превышение по скорректированным уровням на 6,3 дБ (рис. 4).

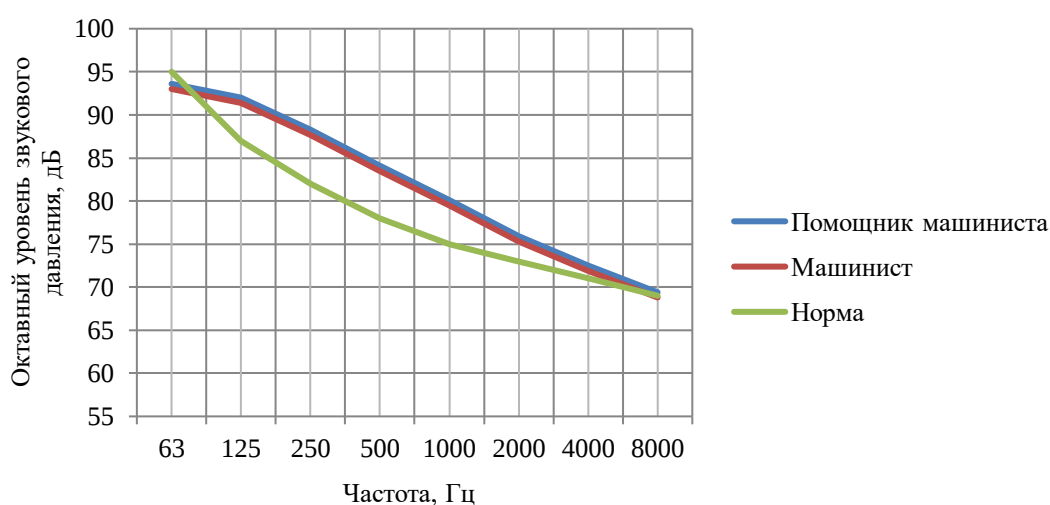


Рис. 3. Результаты СОУТ машиниста и помощника машиниста земснаряда по фактору «шум»

Таким образом, уровни звукового давления и виброускорения, измеренные прибором «Шумомер-вибромметр «Экофизика 110А» в соответствии с методикой⁴ в рамках СОУТ, в дальнейшем будем считать достоверными (рис. 3, 4).

Средства защиты от вибрации и шума могут воздействовать на сам источник возбуждения или на пути его распространения. Необходимо стараться реализовать технические решения по шумо- и виброзащите на стадии проектирования машин. Когда это не выполнено, приходится заниматься этим уже на этапе эксплуатации.

К средствам защиты от передаваемых в рубку машиниста земснаряда вибрации и шума относятся вибродемпфирующие (вибропоглощающие) покрытия. Их основное назначение — снижение виброакустической активности источников шума и вибрации.

⁵Звукоизоляция и звукопоглощение: учеб. пособие. Под ред. Г. Л. Осипова. Москва: Астрель, 2004. 450 с.

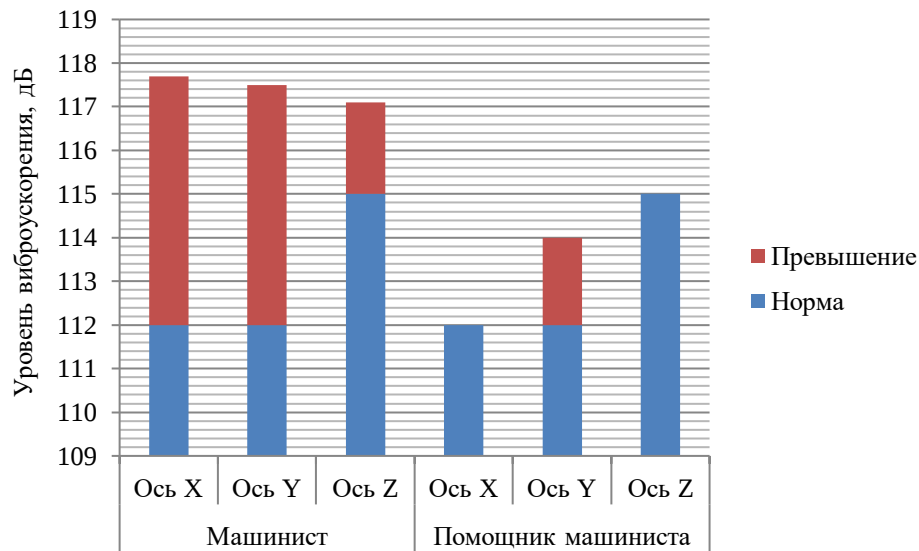


Рис. 4. Результаты СОУТ машиниста и помощника машиниста земснаряда по фактору «вибрация»

Результаты исследования. *Расчетная схема модели виброгашения.* На рис. 5 представлена расчетная схема системы виброгашения на рабочем месте машиниста земснаряда. Так как масса виброгасящего коврика m_{Π} мала, в сравнении с массой платформы m_1 , то влиянием его движения на колебания платформы пренебрегаем. Основная конструкция массой m_1 не опирается на виброизоляторы с приведенной жесткостью. Также не учитываем влияние на виброизоляцию колебаний от воды. Виброгаситель (коврик) связан с основной массой виброизоляторами с приведенной жесткостью C_2 и демпферами с приведенным коэффициентом вязкого сопротивления r .

Расчетная схема системы виброгашения на рабочем месте машиниста земснаряда описана аналитически системой дифференциальных уравнений (1)–(3) (рис. 5).

По данной расчетной схеме справедливы следующие соотношения параметров, участвующих в модельных уравнениях:

$$C_2 = E \cdot \frac{h^3}{12(1-\mu^2)}, m_2 = m_{\Pi} + m_{\text{ч}}, r = 2m_2 \cdot f_i \cdot \eta_{\Sigma}, F(t) = m_{\Pi} \cdot g \cdot a, \quad (1)$$

где E — модуль упругости, Па; μ — коэффициент Пуассона; $m_{\text{ч}}$ — масса человека (машиниста), кг; η_{Σ} — суммарный коэффициент потерь колебательной энергии; $F(t)$ — внешняя сила воздействия, Н.

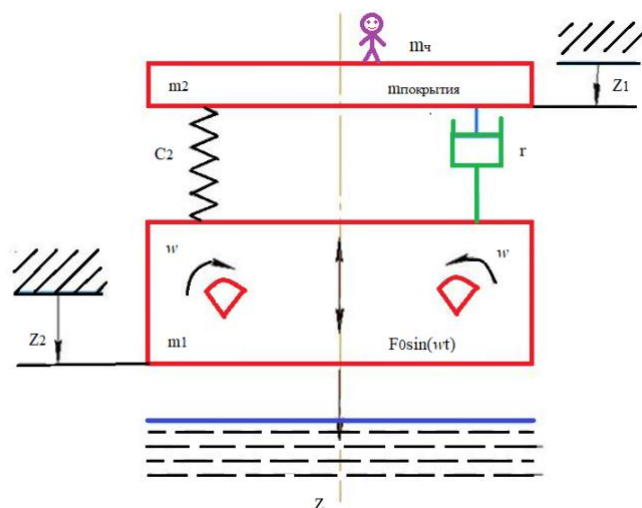


Рис. 5. Расчетная схема системы виброгашения на рабочем месте машиниста земснаряда

Дифференциальные уравнения движения имеют вид:

$$m_1 z_1'' + r z_1' + C_2 z_1 - r z_2' - C_2 z_2 = F_0 \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$m_2 z_2'' - r z_2' - C_2 z_1 + r z_2' - C_2 z_2 = 0, \quad (3)$$

где z_1, z_2 — виброперемещения платформы и виброгасящего настила, м; F_0 — амплитуда внешней возмущающей силы, Н; ω — круговая частота вращения, рад/с.

Система дифференциальных уравнений (2) и (3) в последующем может быть решена как аналитически, так и численными методами.

Однако для целей инженерного расчета, как представляется авторам, вполне приемлемы упрощенные зависимости, когда нет необходимости в точном определении параметров виброгашения.

Алгоритм расчета эффективности виброизоляции. Эффективность вибродемпфирования в конструкциях и элементах конструкций определяется через коэффициент потерь η , который характеризуется отношением энергии, поглощаемой в системе за цикл колебаний ($W_{\text{полг}}$), к максимальной потенциальной энергии в системе ($W_{\text{пот}}$):

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{W_{\text{полг}}}{W_{\text{пот}}} \quad (4)$$

Для расчёта эффективности виброгасящих настилов на рабочем месте машиниста земснаряда ПЗУ-8М используем коэффициент потерь колебательной энергии, который определяется для однослойной конструкции по формуле⁶:

$$\eta = \frac{\frac{E_1 \cdot h_1^3}{12(1-\mu_1^2)} \eta_1 + \frac{E_2 \cdot h_2^3}{12(1-\mu_2^2)} \eta_2}{\frac{E_1 \cdot h_1^3}{12(1-\mu_1^2)} + \frac{E_2 \cdot h_2^3}{12(1-\mu_2^2)}}, \quad (5)$$

где E_1 и E_2 — модули упругости стальной трубчатой платформы и виброгасящего настила, Па; η_1 и η_2 — эффективные коэффициенты потерь колебательной энергии стали и настила; h_1 и h_2 — толщина стального листа обшивки платформы и виброгасящего настила, мм; μ_1 и μ_2 — коэффициенты Пуассона стали и материала настила.

Расчётное снижение октавных уровней звукового давления определяется по формуле:

$$\Delta L = 10 \cdot \lg \frac{\eta}{\eta_{\text{основн}}}, \quad (6)$$

где $\eta_{\text{основн}} = \eta_{\text{платформы}} = 10^{-4}$.

Аналитическая база динамических характеристик и свойств вибродемпфирующих материалов. Сложность определения коэффициента потерь колебательной энергии материалов η связана с отсутствием в литературных источниках проверенных зависимостей η от температуры T и от частотного спектра f . Лишь в источнике¹ имеется некоторая информация о динамических характеристиках некоторых материалов и веществ. Анализ научной литературы показывает, что по данному вопросу также существует ограниченное количество диссертационных исследований, например, в [3] рассматриваются только особенности виброгасящих материалов, используемых в строительстве. Отсутствие достаточной информации о спектре динамических характеристик вибродемпфирующих материалов заставляет в будущем планировать проведение экспериментальных исследований для определения η . На данном этапе исследования в результате анализа доступных литературных источников были собраны и представлены в таблице 1 динамические характеристики некоторых материалов, используемых в качестве виброизолирующих настилов на рабочих местах [4–7].

Рассчитаем ожидаемые снижения уровней шума и вибрации на рабочем месте машиниста земснаряда в зависимости от толщины демпфирующих элементов по формулам (4)–(6). Из справочных данных для стали имеем: $E_1 = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\eta_1 = 10^{-4}$, $\mu_1 = 0,28$, толщина стального листа обшивки платформы земснаряда составляет $h_1 = 1,5$ мм. Динамические характеристики вибродемпфирующих материалов выбираем из таблицы 1. Результаты расчетов представлены на рис. 6. Анализ вычисленных с помощью формулы (6) значений ожидаемого снижения уровней звукового давления и виброускорения при применении вибродемпфирующих материалов позволил сделать ряд выводов.

Таблица 1

Фрагмент создаваемой базы данных динамических характеристик вибродемпфирующих материалов
(составлено авторами)

Материал	Эффективный коэффициент потерь колебательной энергии, η	Модуль упругости $E \cdot 10^{-8}$, Па	Коэффициент Пуассона, μ
Войлок	0,2	5	0
Линолеум 1	0,21	7	0,4
Резина 8797	0,2	0,1	0,4
Виброгасящие эластомерные пластины ⁷			

⁶Чукарин А. Н. Виброакустические основы расчета металлорежущих станков на стадии их проектирования: автореферат дис. ... доктора техн. наук. Ростов-на-Дону, 1995. 29 с.

Материал	Эффективный коэффициент потерь колебательной энергии, η	Модуль упругости $E \cdot 10^{-8}$, Па	Коэффициент Пуассона, μ
ВЭП 10	0,25	0,11	0,025
ВЭП 20	0,3	0,14	0,07
ВЭП 4	0,13	0,11	0,06
Эластомерные вибродемпфирующие пластины Nowelle ⁸			
Nowellemod 1	0,25	0,1	0,03
Nowellemod2	0,13	0,1	0,06
Nowellemod3	0,24	0,11	0,09
Nowellemod4	0,26	0,07	0,09

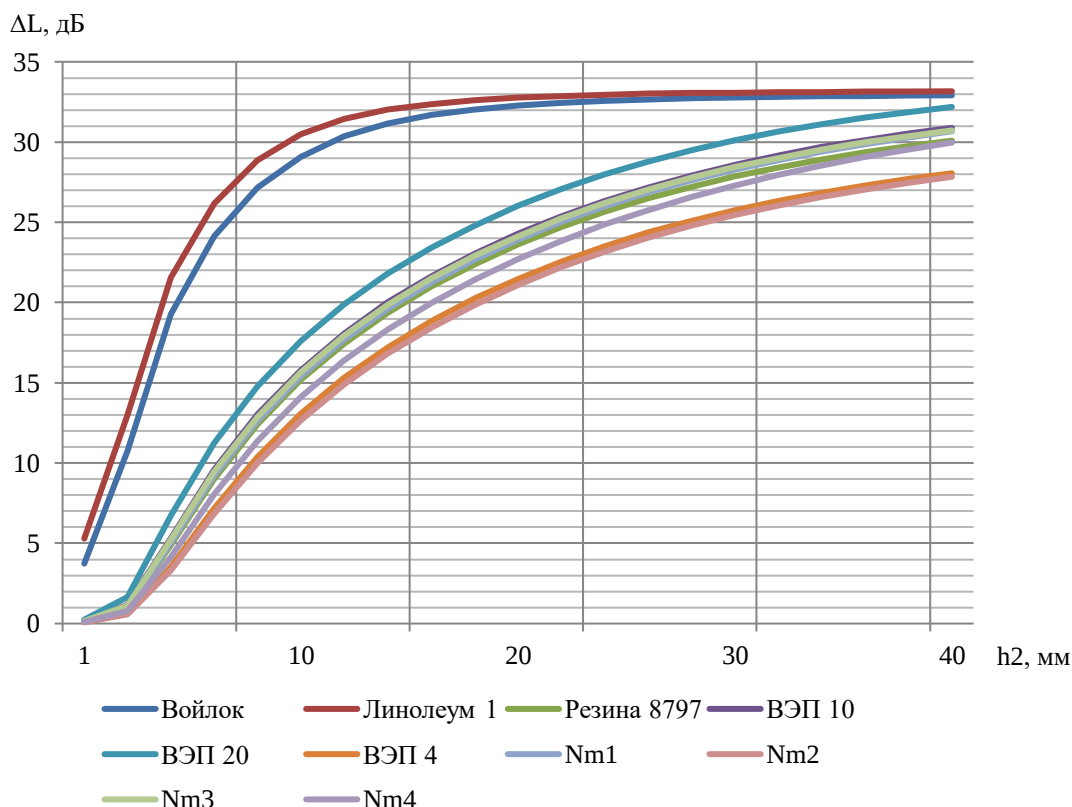


Рис. 6. График зависимости снижения уровня звукового давления от толщины вибродемпфирующего материала h_2 , мм

Такие материалы, как войлок и линолеум 1, при относительно небольшой толщине покрытия (до 40 мм) обеспечивают более эффективную шумо- и виброизоляцию по сравнению с другими материалами. Однако в дальнейшем увеличение толщины нерезинового покрытия (от 40 до 60 мм и выше) не оказывает влияния на эффективность изоляции рабочего места (рис. 7).

Наоборот, результаты расчета эффективности виброгашения показывают, что при толщине покрытия более 49 мм эффективность материалов из эластомерной пластины ВЭП20 увеличивается и продолжает расти, по сравнению с такими материалами, как войлок и линолеум (рис. 7). А при толщине виброгасящего настила ВЭП20 $h_2=4$ мм достигается снижение уровней звукового давления и виброускорения до санитарно-гигиенических норм.

Таким образом, произведенные расчеты эффективности виброизоляции при использовании различных вибродемпфирующих материалов разной толщины показали преимущества виброгасящего настила из эластомерной пластины ВЭП20 по сравнению с другими материалами.

⁷Виброгасящие эластомерные пластины. ТУ 2534-002-61734928-2013 / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/437156319> (дата обращения: 15.02.2023).

⁸Эластомерные вибродемпфирующие пластины Nowelle. ТУ 2534-001-32461352-2015 / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/437156318> (дата обращения: 15.02.2023).

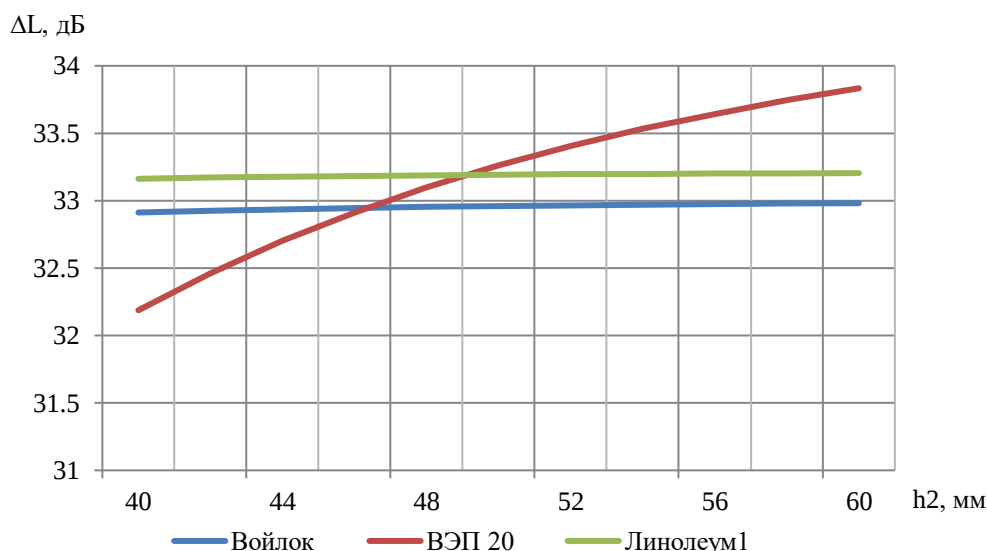


Рис. 7. Сравнение эффективности снижения уровней звукового давления за счёт вибродемпфирования платформы земснаряда резиновой пластиной, войлоком и линолеумом 1, где h_2 — толщина виброгасящего настила, мм

Значимость свойств вибродемпфирующих материалов. Следует пояснить, что вышеприведенный расчёт вибро- и шумоизоляции произведен для частного случая, когда динамические характеристики не изменяются от температуры, спектра шума и вибрации. В реальных условиях эксплуатации под воздействием внешней температуры и частотного спектра колебаний существенно изменяются значения динамических модулей упругости и коэффициентов потерь колебательной энергии демпфирующих материалов, которые, в свою очередь, определяются их химическим строением и молекулярной подвижностью, внутри- и межмолекулярным взаимодействием.

Из зависимости (7) следует, что при низких температурах окружающей среды (ниже 0°C) полимеры находятся в стеклообразном состоянии, а значит, их динамические модули упругости достигают величины 10^9 Па. И наоборот, при высоких температурах (28°C и выше), когда полимерные материалы находятся в высокоэластичном состоянии, величины модулей упругости снижаются до 10^5 – 10^6 Па.

Эффективный коэффициент потерь колебательной энергии полимеров зависит от величины:

$$\omega\tau_1 = \frac{2\tau_1\pi}{T}, \quad (7)$$

где τ_1 — время релаксации; T — период колебаний.

Величина эффективного коэффициента потерь полимера напрямую зависит от его температуры. По этой причине его значение будет возрастать с уменьшением температуры окружающей среды. При низких температурах полимерный материал ведет себя так же, как и при высоких частотах колебаний. С ростом температуры или с уменьшением частоты ωT_1 убывает, потери колебательной энергии сначала увеличиваются, затем, после перехода через максимум (при $\omega T_1=1$), уменьшаются.

При высоких внешних температурах или при низких частотах модуль упругости и эффективный коэффициент потерь достаточно малы.

Проведение экспериментальных исследований динамических характеристик виброгасящих материалов имеет большое значение при проектировании комплексных систем защиты машинистов плавучих средств [8–9]. Так, при отсутствии или недостаточной эффективности работы систем нормализации микроклимата в рубке плавучего средства возможно ухудшение демпфирующих свойств материалов и эффективности виброгашения покрытия (настила, коврика), находящегося под воздействием температур в условиях либо нагревающего, либо охлаждающего микроклимата⁹ [10].

Автоматизация инженерной методики расчета эффективности виброизоляции средствами Excel. Для оперативного изменения и подбора основных параметров вибродемпфирующего покрытия была разработана программа управления в Microsoft Excel (рис. 8, 9). На основе базы данных динамических характеристик вибродемпфирующих материалов программа автоматически определяет суммарный коэффициент потерь колебательной энергии всех слоёв настила, а также снижение уровня звукового давления.

⁹Масленский В. В. Улучшение условий труда операторов технологических и мобильных машин в условиях нагревающего микроклимата: автореферат дис. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2021. 20 с.

Автоматизированный инженерный расчёт виброизоляции при использовании вибродемпфирующих покрытий												
Исходные данные:					Коэффициент потерь колебательной энергии η	Модуль упругости Е·10-8, Па	Коэф. Пуассона μ	Толщина слоя, мм	Температура			
Выбор платформы					Сталь	0,0001	2000	0,28	1,5	20		
Выбор вибродемпфирующего покрытия			1 слой	ВЭП 20	0,3	0,14	0,07	4				
			2 слой	Нет слоя	0	0	0	0				
			3 слой	Нет слоя	0	0	0	0				
			4 слой	Нет слоя	0	0	0	0				
Суммарный коэффициент потерь колебательной					0,000468233							
Снижение уровня звукового давления, дБ					6,704621434							

Рис. 8. Интерфейс программы автоматизированного расчёта эффективности виброизоляции в MS Excel

Файл

Главная

Вставка

Разметка страницы

Формулы

Данные

Рецензирование

Вид

Вставить

Буфер обмена

Calibri

11

Ж

А

У

Шрифт

Выравнивание

Число

Стили

Общий

Условное форматирование

Форматировать как таблицу

Стили ячеек

Перенос текста

Объединить и поместить в центре

F8

Нет слоя

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Автоматизированный инженерный расчёт виброизоляции при использовании вибродемпфирующих покрытий												
2													
3													
4	Исходные данные:							Коэффициент потерь колебательной энергии η	Модуль упругости Е·10-8, Па	Коэф. Пуассона μ	Толщина слоя, мм	Температура	
5	Выбор платформы					Сталь		0,0001	2000	0,28	2	20	
6	Выбор вибродемпфирующего покрытия					1 слой	Резина 8797	0,2	0,1	0,4	3		
7						2 слой	Латунь	0,3	1150	0,35	0,5		
8						3 слой	Нет слоя	0	0	0	0		
9						4 слой	Сплавы меди Хайдаметы (сплавы Ni-Co, Co-Ti, Cu- Сплавы марганца Капрон Текстолит Сталь Алюминий Латунь	0	0	0	0		
10								0,002939517					
11								14,68275916					
12													
13													

Рис. 9. Использование базы данных вибродемпфирующих материалов при проектировании виброзащиты в MS Excel

На начальном этапе подготовки к расчёту оператору необходимо иметь следующие данные: количество слоёв настила (максимальное количество — 4), толщина каждого слоя, температура среды. Далее, подбирая материал каждого слоя, проектировщик виброзащиты добивается максимального снижения уровня звукового давления при заданных параметрах.

Обсуждение и заключение. Авторами выполнена автоматизация расчетов эффективности виброизоляции в Excel. Расчетный модуль указанной выше программы обеспечивается данными аналитической базы динамических характеристик и свойств вибродемпфирующих материалов, которая легко пополняется. Это позволяет осуществлять расчет и обоснованный подбор многослойных конструкций с учетом температуры внешней среды, а также динамических характеристик вибродемпфирующих материалов в зависимости от спектра шума и вибрации. Предлагаемая авторами методика расчёта и выбора вибродемпфирующего материала для систем виброзащиты машиниста может использоваться не только на стадии проектирования новых плавучих средств, но и в период эксплуатации существующих конструкций.

Список литературы

1. Егельская, Е. В. Влияние виброакустических характеристик силовых установок на уровни шума в кабинах плавучих кранов / Е. В. Егельская, А. В. Короткий // Вестник Донского государственного технического университета. — 2012. — Т. 16, № 1–2 (62). — С. 33–37.
2. Щербакова, О. В. Исследование требований санитарных норм, предъявляемых к вибрации и шуму на речном транспорте / О. В. Щербакова, М. К. Романченко // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2010. — № 1. — С. 70–73.
3. Смирнов, В. А. Сравнительный анализ динамических характеристик эластичных пластмасс и резиновых вибродемпфирующих материалов / В. А. Смирнов, М. Ю. Смоляков // Строительные материалы. — 2018. — № 6. — С. 36–40.
4. Кирпичников, В. Ю. Высокоэффективные средства низкочастотного вибродемпфирования с упругим элементом из полимерной пленки / В. Ю. Кирпичников, А. И. Святковский, Ю. Ф. Шлемов // Судостроение. — 2020. — № 1 (848). — С. 44–47.
5. Защита РЭА от механических воздействий путем вибродемпфирования несущих конструкций и сопутствующие этому негативные факторы / П. Н. Володин, С. А. Бростилов, А. О. Бекбаулиев, Н. К. Юрков // Робототехника и системный анализ : сб. статей. Т. 1. — Пенза : Пензенский государственный технологический университет, 2015. — С. 86–89.
6. Лесняк, А. Н. К вопросу об эффективности применения вибродемпфирующих покрытий / А. Н. Лесняк, А. А. Пшеницын, А. Ю. Спиридонов // Судостроение. — 2015. — № 3 (820). — С. 39–41.
7. Скрипченко, Д. С. Методика проведения испытаний по определению динамического модуля упругости, динамического модуля сдвига и коэффициента потерь звукоизоляционных материалов / Д. С. Скрипченко, С. Н. Овсянников // Строительные материалы. — 2017. — № 6. — С. 55–58.
8. Yaitskov, I. A. Theoretical research of noise and vibration spectra in cabins of locomotive and diesel shunting locomotive / I. A. Yaitskov, A. N. Chukarin, T. A. Finotchenko // International Journal of Applied Engineering Research. — 2017. — Vol. 12, No. 21. — P. 10724–10730.
9. Основные аспекты оценки виброакустических факторов / Н. Х. Абдрахманов, А. В. Федосов, А. Н. Хамитова [и др.] // Безопасность техногенных и природных систем. — 2021. — № 3. — С. 13–22.
10. Elements of microclimate normalization system in the cabin of TORUM grain mandy combine/ B. Meskhi, Yu. Bulygin, E. Shchekina, V. Maslensky // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — 2019. — Vol. 403. — Article 012089. [0.1088/1755-1315/403/1/012089](https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012089)

Поступила в редакцию 25.12.2022

Поступила после рецензирования 23.01.2023

Принята к публикации 26.01.2023

Об авторах:

Будовский Александр Владимирович, студент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9155-396X), k55355396@gmail.com

Бulygin Юрий Игоревич, доктор технических наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9155-396X), bulyur_rostov@mail.ru

Павликов Александр Владимирович, ассистент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9155-396X), sanya.pavlikov@mail.ru

Трюхан Александр Вадимович, аспирант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9155-396X), tryukhan.alexandr@mail.ru

Заявленный вклад соавторов

Ю. И. Булыгин — формирование основной концепции, целей и задач исследования, доработка текста, корректировка выводов. А. В. Павликов — сбор и анализ результатов исследований. А. В. Будовский — проведение расчетов, подготовка текста. А. В. Трюхан — доработка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



Научная статья

УДК 331.453

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-39-46>

Обеспечение безопасности труда при эксплуатации железнодорожного транспорта путем модернизации систем вибродемпфирующих накладок и рельсовых пластин

Е. И. Головина  , Д. А. Соколов 

Воронежский государственный технический университет, Российская Федерация, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

 u00111@vgasu.vrn.ru

Аннотация

Введение. Шум и вибрация на железнодорожном транспорте являются опасными как для работников, так и для окружающей среды. Важным является выполнение комплексного анализа последствий воздействия шумового и вибрационного загрязнения на работников железнодорожного транспорта и окружающую среду, а также рассмотрение доступных методов минимизации данного воздействия, создаваемого во время движения поездных составов. Безопасность может быть достигнута за счет обеспечения нормативных уровней шума и вибрации. Цель работы заключалась в оценке безопасности труда при эксплуатации железнодорожного транспорта путем улучшения системы вибродемпфирующих накладок и рельсовых пластин.

Материалы и методы. В процессе исследования проведены анализ возникновения шума и вибрации, оценка их негативного влияния на работников железнодорожного транспорта и окружающую среду. Рассмотрены доступные методы минимизации шумового загрязнения, описана классификация методов борьбы с шумом и вибрацией. В работе были использованы методы и средства, требуемые нормативными документами по обеспечению безопасности труда при эксплуатации железнодорожного транспорта.

Результаты исследований. Исходя из результатов исследования следует, что существует необходимость для усиления мер по комплексной защите и минимизации вредных факторов. Результатом исследования явилось предложение мероприятия по улучшению одного из применяемых методов минимизации шума — установка вибродемпфирующей накладки, для производства которой используется вторичное сырье в виде резиновой крошки. В работе выполнен расчет экономической эффективности одного из предложенных способов минимизации шумового загрязнения и описан положительный эффект после его применения, рассмотрены доступные варианты улучшения звукопоглощения рельс.

Обсуждение и заключения. На основе результатов исследования выявлен положительный экономический эффект одного из предложенных способов улучшения метода минимизации шума.

Ключевые слова: шумовое загрязнение, вибрация, окружающая среда, вибродемпфирующие пластины, минимизация шумового загрязнения, минимизация вибрации.

Благодарности. Авторы благодарят профессора, доктора технических наук [Вячеслава Яковлевича Манохина](#) за наставничество, а также выражают признательность анонимным рецензентам.

Для цитирования. Головина, Е. И. Обеспечение безопасности при эксплуатации железнодорожного транспорта путем модернизации систем вибродемпфирующих накладок и рельсовых пластин / Е. И. Головина, Д. А. Соколов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2023. — № 1. — С. 39–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-39-46>

© Головина Е. И., Соколов Д. А., 2023

Ensuring Occupational Safety at Railway Transport Operation by Upgrading the Systems of Vibration Damping Plates and Rail Plates

Elena I. Golovina , Dmitriy A. Sokolov 

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

✉ u00111@vgsu.vrn.ru

Abstract

Introduction. Noise and vibration in railway transport is a dangerous type of pollution for both the workers and the environment. It is important to carry out a comprehensive analysis of the effects of noise and vibration pollution on railway transport workers, the environment, and to consider available methods to minimize harmful effects created during the movement of trains. Safety can be achieved by ensuring regulatory noise and vibration levels. The work objective is to assess the safety of work during the operation of railway transport by improving the system of vibration damping pads and rail plates.

Materials and Methods. In the course of the study, an analysis of the occurrence of noise and vibration, an assessment of their negative impact on railway transport workers and the environment was carried out. The available methods of noise pollution minimization are considered, the classification of noise and vibration control methods is described. The methods and means required by the regulatory documents on labor safety during the operation of railway transport were used in the work.

Results. Based on the results of the study, it follows that there is a need to strengthen measures for comprehensive protection and minimization of harmful factors. The result of the study was the proposal to improve one of the applied methods of noise minimization — the installation of a vibration damping pad, for the production of which secondary raw materials in the form of rubber crumbs are used. The paper calculates the economic efficiency of one of the proposed methods of minimizing noise pollution and describes the positive effect after its application, considers available options for improving the sound absorption of rails.

Discussion and Conclusion. Based on the results of the study, the positive economic effect of one of the proposed ways to improve the noise minimization method was revealed.

Keywords: noise pollution, vibration, environment, vibration damping plates, noise pollution minimization, vibration minimization.

Acknowledgements. The authors would like to thank Professor, Dr. Sci. (Eng) Vyacheslav Yakovlevich Manokhin for mentoring, and also express their gratitude to anonymous reviewers.

For citation. E. I. Golovina, D. A. Sokolov. Ensuring Occupational Safety at Railway Transport Operation by Upgrading the Systems of Vibration Damping Plates and Rail Plates. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2023, no.1, pp. 39–46. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-39-46>

Введение. Комплексный анализ шумового и вибрационного загрязнения от железнодорожного транспорта показывает долгосрочное негативное воздействие на здоровье человека [1]. Это воздействие опасно вследствие возникновения различных заболеваний — вибрационной болезни, болезней слухового нерва (невриты, слуховая диссинхрония) [2]. Доля шума в факторной оценке условий труда машинистов и помощников машинистов локомотивов составляет более 35 % [3]. При проведении специальной оценки условий труда устанавливают степень вредности и опасности при действии виброакустических факторов согласно Р 2.2.2006–05 с учётом их временных характеристик (постоянный, непостоянный шум, вибрация и т.д.)¹. Создание комфортной рабочей среды для людей, работающих на железнодорожном транспорте, достигается минимизацией воздействия таких факторов.

При оценке влияния шумового загрязнения и вибрации в рамках специальной оценки условий труда применяют последовательную методику, которая включает: идентификацию факторов, которые негативно влияют на работников; исследования и измерения факторов; отнесение условий труда к определенному классу, исходя из степени вредности [4]. При оценке условий труда внимание уделяется характеру шума (постоянный или непостоянный) и его тоновой характеристике. Когда работник подвергается воздействию постоянного

¹ Р 2.2.2006–05. Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда / Комиссия по государственному санитарно-эпидемиологическому нормированию; Главный государственный санитарный врач Российской Федерации // Бюллетень нормативных и методических документов Госсанэпиднадзора. 2005. № 3 (21). 114 с.

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

шума, отнесение условий труда к классу или подклассу под воздействием виброакустических факторов осуществляется по результатам измерения уровней звукового давления в октавных диапазонах со средними геометрическими частотами 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц (таблица 1) [5].

Таблица 1

Классы условий труда в зависимости от уровней шума, локальной, общей вибрации, инфра- и ультразвука на рабочем месте по Р 2.2.2006–05²

Название фактора, показатель, единица измерения	Класс условий труда					
	Допустимый	Вредный				Опасный
	2	3.1	3.2	3.3	3.4	4
	Превышение ПДУ до ...дБ/раз (включительно):					
Шум, эквивалентный уровень звука, дБА	ПДУ	5	15	25	35	35
Вибрация локальная, эквивалентный корректированный уровень (значение) виброскорости, виброускорения (дБ/раз)	ПДУ	3/1,4	6/2	9/2,8	12/4	12/4
Вибрация общая, эквивалентный корректированный уровень виброскорости, виброускорения (дБ/раз)	ПДУ	6/2	12/4	18/6	24/8	24/8
Инфразвук, общий уровень звукового давления, дБ/Лин	ПДУ	5	10	15	20	20
Ультразвук воздушный, уровни звукового давления в 1/3 октавных полосах частот, дБ	ПДУ	10	20	30	40	40
Ультразвук контактный, уровень виброскорости, дБ	ПДУ	5	10	15	20	20

Оценка условий труда по виброакустическим факторам на рабочих местах машинистов и помощников машинистов, путевых и станционных рабочих проводится аналогично стационарным рабочим местам, где имеется оборудование, являющееся источником шума и вибрации. Предельно допустимые уровни шума на рабочих местах определяются с учётом тяжести и напряжённости трудовой деятельности по СН 2.2.4/2.1.8.562–96³.

Цель данного исследования заключается в оценке безопасности труда при эксплуатации железнодорожного транспорта путем модернизации систем вибродемпфирующих накладок и рельсовых пластин.

Основным источником шума на железнодорожном транспорте является шум, издаваемый составом при движении, который создают путевые машины и техническое оборудование [1]. Вибрация передается от колесных пар к корпусу вагона и имеет свойство распространяться в окружающую среду [5]. Повышенные шум и вибрация считаются критериями, соответствия которых нормативным величинам технически наиболее сложно добиться [6].

Результаты многолетних клинических наблюдений и обследований больших групп людей различных специальностей, работа которых связана с воздействием интенсивного шума, позволяют считать шумовую болезнь самостоятельной формой профессиональной патологии⁴. Шумовой режим, значительно превышающий нормативы, при непрерывном воздействии на человека негативно сказывается на здоровье: страдают органы слуха, нервная и вегетативная системы [7]. Уровень шума от железных дорог зависит от множества факторов. На это влияют, например, техническое состояние путей и подвижного состава, тип используемых тормозов, объем движения или рельеф местности. Вагонные и ремонтно-экипировочные депо, которые расположены

² Р 2.2.2006-05. Гигиена труда. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда.

³ СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы / Госкомсанэпиднадзор РФ // Консорциум «Кодекс»: [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901703278> (дата обращения: 18.01.2023).

⁴ Терентьева Л. С. Геоэкологическая оценка акустического загрязнения примагистральных территорий: на примере г. Воронежа : дис. канд. географ. наук. Воронеж, 2008. 152 с.

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

вблизи жилых районов наносят существенный вред здоровью человека и целостности природных систем. Шум и вибрация, которые возникают при движении поездов, также наносят вред человеку и окружающей среде. Значительное превышение нормативов уровня шума приносит дискомфорт жителям, может являться значимой причиной ухудшения самочувствия и снижения работоспособности. Длительное и систематическое воздействие шумового загрязнения и вибрации может стать началом развития заболеваний нервной и вегетососудистой систем. Количество людей, подверженных высокой степени нарушения сна очень велико, большинство людей сталкиваются с воздействием постоянного шума 50–60 дБ именно ночью, что при отсутствии других дневных источников шума является одним из основных факторов бессонницы и систематических неврозов.

В классификации методов минимизации шума используют следующие направления: минимизация или устранение шума в источнике, минимизация шума от источника к объекту (звукоизоляция, звукопоглощение, глушение) и защита людей специальными средствами. Защиту от шума можно реализовать средствами коллективной защиты (акустические экраны, ограждения, кожухи, вибродемпфирующие накладки), либо средствами индивидуальной защиты (накладные наушники, беруши).

Материалы и методы. Актуальными методами борьбы с шумовым воздействием являются технические (своевременное техническое обслуживание оборудования и железнодорожных путей, шлифовка рельс и т. д), архитектурно-планировочные и акустические (установка шумозащитных экранов, кожухов, вибродемпфирующих накладок) методы.

На сегодняшний день существует множество альтернативных методов, которые способствуют снижению шумового воздействия путем применения дополнительных технических решений: высокоупругие прокладки для рельсовых креплений, подбалластные маты, упругие опоры для пути на плитах с балластным корытом, системы под названием «масса-пружина». Системы «масса-пружина» применяются при предъявлении самых жестких требований к защите от структурных шумов и при наличии конструктивных возможностей реализации.

Результаты теоретических исследований показали эффективность конструкционной схемы «масса-пружина». Наиболее эффективными являются конструкции, в составе которых присутствуют монолитный бетон либо бетонные элементы [8]. При проектировании упругой опоры для систем «масса-пружина» выбранное конструктивное решение определяет итоговую эффективность системы виброизоляции.

Рассмотрим актуальные конструктивные методы борьбы с шумом более подробно. Ленточная опора, как вид конструкции, используется в системах «масса-пружина» (рис. 1). Основной плюс такой опоры — эффективная компенсация вибрации, которая возникает во время движения поезда за счет относительно большой площади оснований. При внедрении ленточной опоры можно получить снижение негативно влияющих на человека при долгосрочном воздействии частот верхнего строения пути при меньших затратах. Положительным эффектом является снижение вибрации и шума.

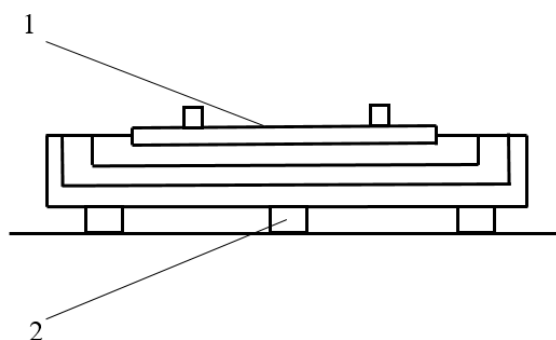


Рис. 1. Вариант схемы установки ленточных опор: 1 — рельсовое полотно; 2 — ленточные опоры

Материалы, применяемые в системе «масса-пружина» должны обладать рядом свойств: сопротивление кратковременным, пиковым нагрузкам, иметь мелкоячеистую, статическую структуру, что дает возможность в процессе эксплуатации сохранять полезную эффективность опор.

Точечные опоры возможно использовать только при конкретной конструкции. Плиты из монолитного бетона поднимают, опоры устанавливаются через специальные установочные отверстия (рис. 2). Стоит заметить, что площадь опоры крайне мала, при проектировании опор такой конструкции необходимо учитывать горизонтальные силы, которые возникают во время движения поезда. Для ограничения горизонтальных сдвигов в соответствии с заданными параметрами необходимо найти оптимальное соотношение между модулем сдвига, эластичностью материала, толщиной и площадью опоры.

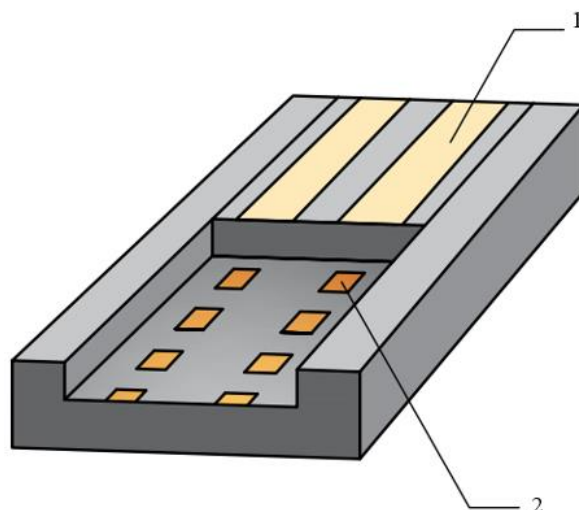


Рис. 2. Вариант схемы установки точечных опор: 1 — рельсовое полотно; 2 — точечные опоры

После установки точечные опоры могут обеспечить защиту от структурных шумов и снизить собственные частоты. Использование таких систем позволяет достичь минимизации шумов вплоть до 30 дБ и более. Основная сложность в использовании такого метода заключается в сложной установке, зависимости от конструкции плит, высокой стоимости установки и планового ремонта.

Одним из действенных и сравнительно бюджетных методов снижения шума от системы «колесо-рельс» в источнике образования является снижение звукоизлучения рельса. Это достигается путем установки вибродемпфирующих пластин [1].

Вибродемпфирующая пластина представляет собой накладку, которая устанавливается на рельсы с целью звукопоглощения. Преимущество пластин заключается в том, что они предотвращают распространение шума на окружающую территорию. Благодаря своему конструктивному составу они поглощают вибрации, возникающие в системе «колесо-рельс», и, тем самым, предотвращают образование шума в рельсе. В случае движения поезда, при контакте колеса с рельсом, генерируется шум с переменным спектром. Рельсовый демпфер работает по системе поглощения вибраций на частотах с наибольшим уровнем шума. Один из вариантов схем вибродемпфирующей накладки представлен на рис. 3.

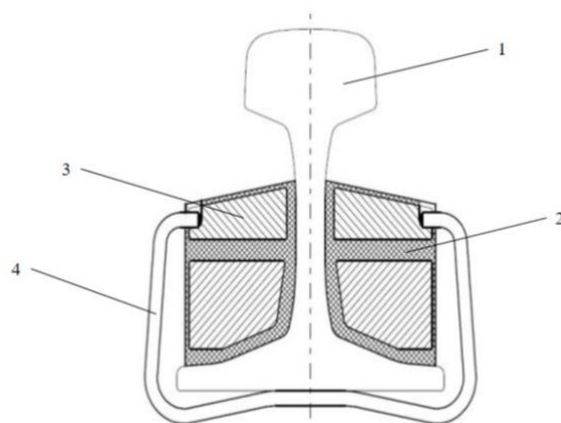


Рис. 3. Вариант схемы установки вибродемпфирующей пластины:
1 — рельс; 2 — накладка; 3 — наполнение накладки; 4 — крепление накладки

В ряде диапазонов частот (низких и высоких) структура пластин не подходит для снижения уровня шума. С другой стороны, в случае частот, характерных для большей части генерируемого шума, накладка является наиболее эффективным методом минимизации. Рельсовая накладка, предотвращающая распространение вибрации, также способствует качественному снижению вибрационного воздействия.

Авторами предложено провести модернизацию существующих методов снижения шумового и вибрационного загрязнения путем использования более экономичных материалов накладок и матов без полной реконструкции рельсового полотна.

Результаты исследования. Рельсовые накладки обычно снижают уровень шума примерно на 3–4 дБ, при улучшении конструкции — на 5–8 дБ. Авторами на основе анализа исследований построен график с результатами измерений (рис. 4)⁵. Предлагается несколько путей улучшения конструкции для получения лучшего результата минимизации шума за счет применения современных конструкций, таких как непрерывный сварной рельс, упругое крепление рельсов, антивибрационные маты и гибкие прокладки под рельсами. Следует учитывать, что такие улучшения доступны только при замене либо прокладке нового железнодорожного полотна. Недостатком представленных мероприятий является высокая стоимость и сложность установки.

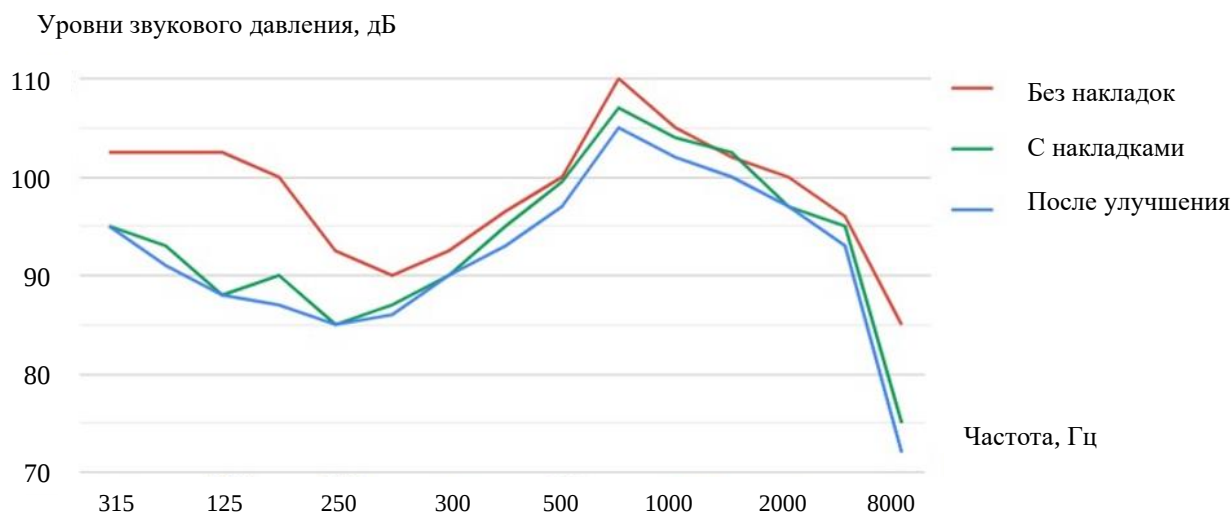


Рис. 4. График с результатами измерений

При проведении измерений должно быть исключено влияние шума других транспортных средств и объектов промышленности на результаты измерений. Путем анализа доступных вариантов был найден бюджетный и сравнительно простой вариант улучшения — использование системы матов из переработанных отходов синтетического волокна, которые будут повторять форму рельсов. Он состоит из 3 или 5 частей, которые размещаются между рельсами и рядом с ними, при этом комбинация значительно снижает шум от железнодорожного движения (рис. 5). Стоит отметить, что при использовании сырья для изготовления мата из вторичных материалов, можно будет снизить стоимость матов до 20–30 % и более. Стоит отметить, что использование материалов, в производстве которых используется резиновая крошка в количестве более 60 %, также могут быть использованы в качестве замены наполнения накладки вибродемпфирующей пластины.

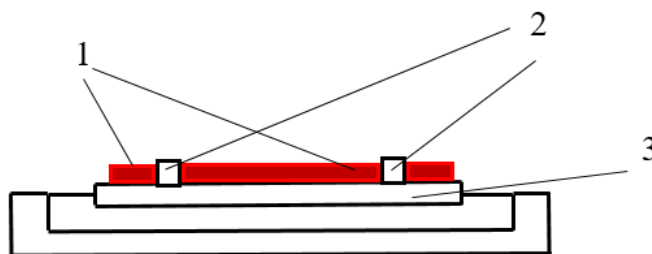


Рис. 5. Вариант схемы установки системы матов: 1 — система матов; 2 — рельсы; 3 — рельсовое полотно

При рассмотрении использования системы матов стоит выявить все стороны финансового вопроса. Экономическая оценка эффективности затрат на охрану среды необходима для наиболее рационального использования ограниченных материальных и финансовых ресурсов предприятия или организации [9]. Она

⁵ ГОСТ 32203 — 2013. Железнодорожный подвижной состав. Акустика. Измерение внешнего шума / ВНИИНМАШ; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М., 2014. 20 с.

служит для оценки уже полученных преимуществ (или недостатков), определения наиболее подходящего варианта для экологического проекта, а также для определения объема затрат, необходимых для достижения оптимальных экологических и экономических результатов. При разработке выбора варианта внедрения нового оборудования или технологии, направленных на экологизацию производства, следует учитывать безопасность для здоровья человека и окружающей среды, а также экологичность применяемых технологий и материалов.

Для создания модели расчета экономической эффективности при реализации нового метода снижения уровня шума и вибрации используем методику, описанную в [10], по которой будут произведены основные вычисления по пунктам. Экономическая оценка мероприятий по минимизации и защите от шума рассчитывается как расчет годового экономического эффекта при использовании мероприятий. Экономический эффект за год находится путем расчета разности между результатом, который получен при применении мероприятий по защите, и годовых затрат на эти мероприятия [11].

На основе анализа открытых источников принимаем, что лист вибродемпфирующего мата стоит от 3,5 тыс. руб. за лист размером от одного м². В результате расчетов представлена модель экономической эффективности от внедрения применения системы матов, проиллюстрированная таблицей 2.

Таблица 2

Модель экономической эффективности при использовании улучшения метода минимизации шумового и вибрационного воздействия

Экономический эффект от мероприятий по защите от шума, Р, тыс.руб./год	Траты на шумозащитные мероприятия, составленные на один год, ПЗ, тыс. руб./год	Экономический эффект за год, Э, тыс. руб./год
909	264	645

Обсуждение и заключения. Для минимизации вредного виброакустического воздействия авторами предложена мера по улучшению одного из применяемых методов — установка вибродемпфирующих накладок. Для их производства может использоваться вторичное сырье в виде резиновой крошки в количестве более 60 % от объема материала. Такой вариант улучшений имеет преимущество в местах, где планируется плановый ремонт накладок, а также там, где накладки еще не установлены.

Путем модернизации можно достигнуть снижения уровня шума на 5–8 дБ, удешевления материала и упрощение установки пластин. Годовой экономический эффект от внедрения данного способа улучшения условий труда при эксплуатации железнодорожного транспорта составляет порядка 645 тыс. руб.

Список литературы

1. Соколов, Д. А. Характеристика шумового загрязнения и вибрации железнодорожного транспорта. Минимизация воздействия шума и вибрации на работников железнодорожного транспорта / Д. А. Соколов // Студент и наука. — 2022. — № 1(20). — С. 65–67.
2. Чеботарев, А. Г. Виброакустические факторы рабочей среды при подземной и открытой добыче твёрдых полезных ископаемых / А. Г. Чеботарев, Ю. П. Пальцев // Горная промышленность. — 2012. — № 5(105). — С. 50–54.
3. Пономарев, В. М. Исследования уровней звука в кабинах локомотивов в условиях эксплуатации / В. М. Пономарев, Д. Н. Васильева // Наука и техника транспорта. — 2016. — № 2. — С. 29–34.
4. Готлиб, Я. Г. Вопросы ограничения шума для оценки условий труда / Я. Г. Готлиб, Н. П. Алимов, В. Н. Азаров // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. — 2013. — № 13(135). — С. 70–83.
5. Ярусов, Н. И. Шум как вредный производственный фактор / Н. И. Ярусов, В. В. Окулова // Безопасность в профессиональной деятельности. — 2021. — С. 294–298.
6. Анализ и оценка безопасности при эксплуатации дробеструйного аппарата в литейном производстве / В. Я. Манохин, Л. Ф. Дроздова, Е. И. Головина, Д. А. Соколов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 2. — С. 36–42. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-2-36-42>
7. Сальникова, Л. А. / Анализ влияния шума и запыленности на железобетонном производстве / Л. А. Сальникова, Д. А. Соколов, Е. И. Головина // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. — 2022. — № 1(26). — С. 48–50.
8. Канев, Н. Г. Прогноз вибрации рельсового транспорта при проектировании виброизоляции фундаментов зданий. / Н. Г. Канев // Фундаменты. — 2020. — № 2. — С. 51–52.

9. Петрова, Е. Е. Анализ эффективности природоохранных затрат в инвестиционном анализе / Е. Е. Петрова // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. — 2010. — № 4(14). — С. 252–255.

10. Суетина, Т. А. Методика оценки экономической эффективности инвестиций во внедрение мероприятий бережливого производства / Т. А. Суетина, Д. М. Сафина // Российское предпринимательство. — 2018. — Т. 19. — № 10. — С. 3085–3094.

11. Ушакова, Е. О. Методика определения экономической эффективности затрат на природоохранные мероприятия // Гео-Сибирь. — 2006. — Т. 6. — С. 185–190

Поступила в редакцию 09.12.2022.

Поступила после рецензирования 26.12.2022.

Принята к публикации 26.12.2022.

Об авторах:

Головина Елена Ивановна, заместитель декана по учебной работе, факультет инженерных систем и сооружений, доцент кафедры «Техносферная и пожарная безопасность» Воронежского государственного технического университета (394006, РФ, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), [ORCID, u00111@vgasu.vrn.ru](https://orcid.org/0001111@vgasu.vrn.ru)

Соколов Дмитрий Алексеевич, студент кафедры «Техносферная и пожарная безопасность» Воронежского государственного технического университета (394006, РФ, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), [ORCID, dmitriysokolov598@gmail.com](https://orcid.org/dmitriysokolov598@gmail.com)

Заявленный вклад соавторов:

Е. И. Головина — научное руководство, формирование основной концепции, цели и задачи исследования. Д. А. Соколов — проведение эксперимента, анализ результатов исследований, подготовка и оформление текста статьи, формирование выводов.

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



Научная статья

УДК 614.841

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-47-55>

Применение технологий геопозиционирования, мониторинга для блокирования и тушения пожаров степных и на хлебных массивах

О. В. Денисов , К. В. Хохлова , М. В. Грибашов 

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

✉ ovd63@mail.ru

Аннотация

Введение. Актуальность данного исследования определяется возрастающей необходимостью обеспечения надежной защиты степных и сельскохозяйственных территорий от возможных пожаров с помощью инновационных методов мониторинга, применения пожарной техники, систем пожарного водоснабжения и современных средств пожаротушения. Несмотря на внедрение новых, современных и безопасных для окружающей природной среды и человека технических решений, направленных на предупреждение и тушение пожаров, все еще имеется необходимость улучшения технологий, используемых в области пожарной безопасности, которая для страны является серьезной проблемой. Цель настоящего исследования — оценка технической возможности эффективного применения технологий геопозиционирования, мониторинга на основе комплекса специальных устройств, модельного расчета условий надежного блокирования пожаров на степных и сельскохозяйственных территориях, в частности, на полях с хлебными массивами.

Материалы и методы. Основными методами исследования явились анализ источников нормативно-методической и научно-технической информации, математическое моделирование, экстраполяция на расчётно-графические материалы, физический эксперимент.

Результаты исследования. Представлены данные для разработки и внедрения в практическую деятельность пожарных подразделений новых технических решений и технологий мониторинга и тушения степных пожаров и пожаров на хлебных массивах, создания и развития материально-технической, методической и информационной базы обеспечения системы блокирования геоэкологических пожаров.

Обсуждения и заключение. Анализ причин возникновения пожаров на степных и сельскохозяйственных территориях позволил наметить основные методы их мониторинга. На основе изучения прототипов, изменения технических и компоновочных характеристик главных элементов устройства предложено рациональное решение (ноу-хау) для тушения пожаров степных и на хлебных массивах — трактор-грунтомет-полосопрокладыватель. При этом сделан вывод, что повысить эффективность многофункционального гусеничного или колесного робототехнического комплексов можно также и за счет элементов навигационных систем (геопозиционирования) и мониторинга с использованием систем автоматического управления процессами.

Ключевые слова: степные пожары, пожары на хлебных массивах, технологии геопозиционирования, мониторинг пожаров.

Благодарности. Авторы выражают благодарность заместителю начальника 2 ПСО ФПС ГПС Главного управления России по Ростовской области подполковнику Коваленко С. Н. и директору ООО «Синтекс» Токареву А. А. за критические замечания по статье, сделанные ранее. Авторы также выражают признательность ее анонимным рецензентам.

© Денисов О. В., Хохлова К. В., Грибашов М. В., 2023

Для цитирования. Денисов, О. В. Применение технологий геопозиционирования, мониторинга для блокирования и тушения пожаров степных и на хлебных массивах / О. В. Денисов, К. В. Хохлова, М. В. Грибашов // Безопасность техногенных и природных систем. — 2023. — № 1. — С. 47–55. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-47-55>

Original article

Application of Geo-Positioning and Monitoring Technologies for Blocking and Extinguishing Fires in Steppe and Grain Areas

Oleg V. Denisov , Kristina V. Khokhlova , Maksim V. Gribashov 

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ ovd63@mail.ru

Abstract

Introduction. The relevance of this study is determined by the increasing need to ensure reliable protection of steppe and agricultural territories from possible fires with the help of innovative monitoring methods, the use of fire equipment, fire water supply systems and modern fire extinguishing means. Despite the introduction of new, modern and safe for the environment and people technical solutions aimed at preventing and extinguishing fires, there is still a need to improve the technologies used in the field of fire safety, which is a serious problem for the country. The work objective is to assess the technical feasibility of effective application of geo-positioning technologies and monitoring based on a set of special devices, model calculation of conditions for reliable fire blocking on steppe and agricultural territories, in particular, in fields with grain areas.

Materials and Methods. The main research methods are the analysis of sources of normative-methodological and scientific-technical information, mathematical modeling, extrapolation to computational and graphic materials, physical experiment.

Results. The data are presented for the development and implementation in the practical activities of fire departments of new technical solutions and technologies for monitoring and extinguishing steppe fires and fires in grain areas, the creation and development of material, technical, methodological and information base for the system of blocking geoecological fires.

Discussion and Conclusion. The analysis of the causes of fires in steppe and agricultural territories allowed us to outline the main methods of their monitoring. Based on the study of prototypes, changes in the technical and layout characteristics of the main elements, a rational solution (know-how) for extinguishing fires in steppe and grain areas is proposed — a tractor-soil-thrower-fire-break maker. At the same time, it is concluded that it is also possible to increase the efficiency of multifunctional tracked or wheeled robotic complexes due to elements of navigation systems (geo-positioning) and monitoring using automatic process control systems.

Keywords: steppe fires, grain areas fires, geo-positioning technologies, fire monitoring.

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the deputy head of the Second Fire and Rescue Unit of the Federal Fire-Fighting Service of the State Fire-Fighting Service of the Main Directorate of Russia for the Rostov region, Lieutenant Colonel S. N. Kovalenko and Director of Syntex LLC A. A. Tokarev for the critical comments to the article made earlier. The authors also express their gratitude to its anonymous reviewers.

For citation. O. V. Denisov, K. V. Khokhlova, M. V. Gribashov. Application of Geo-Positioning and Monitoring Technologies for Blocking and Extinguishing Fires in Steppe and Grain Areas. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2023, no. 1, pp. 47–55. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-47-55>

Введение. Анализ научной и технической литературы выявил недостаток имеющихся данных по техническим особенностям тушения степных пожаров. Большая часть таких пожаров (до 80 %, по разным источникам) имеет антропогенный характер (нарушения правил пожарной безопасности при обращении с открытым огнем и при эксплуатации неисправной, устаревшей или необслуженной техники). Также известны природные факторы таких возгораний (часто пожары возникают в результате удара молнии во время грозы).

Пожар степной — это естественно или искусственно вызванный пал в степях. Его производят для вытеснения нежелательных растений и уничтожения мертвой растительности с целью улучшения травостоя. По механизму распространения огня степной пожар схож с низовым лесным пожаром, но скорость распространения его выше, что обусловлено рядом факторов, а именно большей горючестью сухих степных трав и высокой скоростью приземного ветра в степи. Такие пожары наносят значительный урон естественной среде (растительному покрову и животному миру), могут представлять опасность для людей и объектов экономики^{1,2} [1, 2].

Причинами пожаров степных и на хлебных массивах также могут быть аварии наземного и воздушного транспорта, хлебоуборочной техники, террористические акты, военные действия и небрежное обращение с открытым огнем. Наиболее пожароопасная обстановка складывается в конце весны и в начале лета, когда стоит сухая и жаркая погода. Подобные пожары характеризуются возникновением одного или нескольких очагов, которые быстро распространяются на значительные территории. Они обладают высокой скоростью, достигающей в определенные моменты 30 км/ч. Этот фактор обусловлен большим количеством сухой растительности, созревших злаков и прочих легковоспламеняющихся материалов. Степные пожары и пожары на хлебных массивах представляют огромную опасность не только для людей, но и для сельскохозяйственных животных. Огонь, который подступает со всех сторон, оказывает сильное психологическое давление, тем самым может спровоцировать массовую панику, которая зачастую приводит к многочисленным жертвам.

Проведенный анализ использования технических средств при тушении природных и техногенных пожаров, произошедших в России за последние три года, показал, что для предупредительных работ и тушения возгораний, ликвидации их последствий активно используется строительная и сельскохозяйственная техника³ [3, 4].

Актуальность исследованию придает еще и возрастающая необходимость использования усовершенствованной техники и современных устройств, обеспечивающих пожарную безопасность в степях и на хлебных массивах, при борьбе с природными пожарами, усложненными наличием на местности складов с химическими веществами, например, удобрениями [3, 5].

Материалы и методы. Наиболее часто самосвалы и бульдозеры используются для расчистки завалов, создания минерализованных полос при степных и природных пожарах. Доказана на практике эффективность применения строительной и сельскохозяйственной техники в качестве специальной, а также технологий аэрокосмической разведки и мониторинга для обеспечения пожарной безопасности.

Повысить эффективность многофункционального гусеничного или колесного робототехнического комплекса можно за счет элементов навигационных систем, собственно технических устройств геопозиционирования. Примером может служить глобальная российская навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС). Данная система может транслировать гражданские сигналы в любой точке страны и мира на безвозмездной основе и без ограничений, с автоматическим управлением процессами мониторинга. ГЛОНАСС с начала 2000-х годов (со времени принятия федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система») активно используется в интересах предупреждения и тушения геоэкологических пожаров.

По экспертным оценкам, применение систем и технологий геопозиционирования и мониторинга защищаемых территорий позволит на 15 % сократить усилия и затраты на прогнозирование пожароопасных ситуаций, на 20 % — расходы, а также уменьшить количество требуемого личного состава, применяемой пожарной техники, воды или огнетушащих средств. Все это вместе повысит эффективность работы и обеспечит возможность тушить пожары ночью.

¹Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: федеральный закон №123-ФЗ от 22.07.2008 / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов: [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/902111644?section=status> (дата обращения: 31.05.2022).

²О пожарной безопасности: федеральный закон № 69-ФЗ от 21.12.1994 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2014. № 5. Ст. 1.

³Денисов О. В., Хохлова К. В., Попко Г. А. К разработке мероприятий по предупреждению и тушению локальных пожаров на полигонах твердых бытовых отходов // Актуальные проблемы науки и техники: мат. Всероссийской науч.-практ. конф. Ростов-на-Дону, 2021. С. 136–137.

Технологии геопозиционирования и мониторинга помогут повысить эффективность за счет карты-задания для дифференцированных минерализации, вспашки и орошения степных территорий, представленной на рис. 1, 2. Внешне же техника, осуществляющая указанные работы, ничем не отличается от обычной.

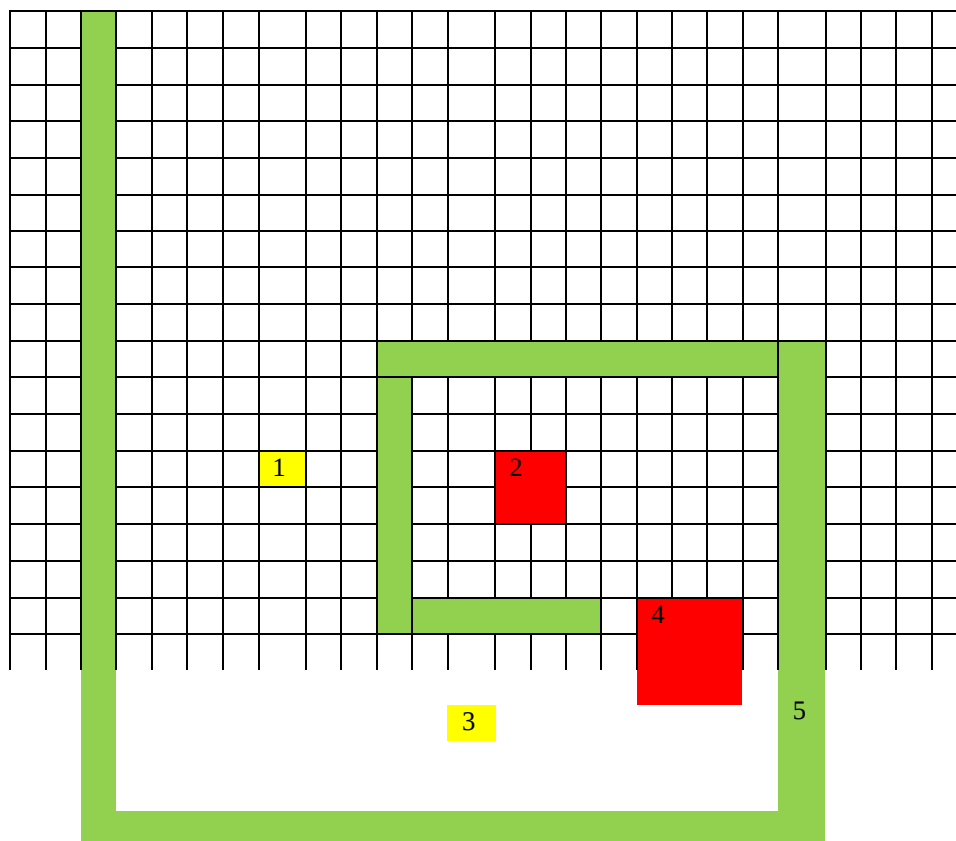


Рис. 1. Упрощенная карта-схема задания мониторинга и геоэкологического зонирования степных территорий и хлебных массивов: 1 и 3 — зоны с опасными критическими параметрами среды; 2 и 4 — зоны предположительного горения; 5 — маршрут техники в соответствии с картой-заданием



Рис. 2. Работа техники по вспашке заданной территории [3]

Концепция точной работы специальной пожарной техники, представляющая собой технологии геопозиционирования и мониторинга, базируется на подробных знаниях защищаемых территорий. Имеется в виду, что на таких территориях есть участки, неоднородные по противопожарному состоянию, влажности почвы и воздуха, температуре окружающей среды, направлению и скорости ветра. Данные параметры необходимо постоянно отслеживать, то есть осуществлять их системный мониторинг. Вариант такого технического комплекса представлен на рис. 3.

Главной задачей противопожарных служб является максимальное использование потенциала каждого локального степного участка, оптимизация применяемой пожарной техники и личного состава и, как следствие, повышение эффективности пожаротушения.



Рис. 3. Система мониторинга погодных условий [3]

Точная картография для предупреждения и тушения пожаров степных и на хлебных массивах необходима, чтобы по данным локального увлажнения почвенного слоя рассчитать, сколько понадобится воды или огнетушащих веществ (ОТВ) для тушения возгораний, таким образом возможно оценить и затраты на увлажнение или тушение [6, 7]. При использовании этого метода данные по дифференцированному увлажнению или тушению участков также могут оперативно наноситься на карту.

Такая картография является основой для принятия решений, например, при выборе типа и количества необходимой пожарной техники для тушения на данном степном участке или хлебном поле. Картография степных участков и хлебных массивов позволяет:

- экономить средства за счет локального увлажнения или точного тушения лишь тех участков, где это необходимо;
- экономить время, ГСМ. Считается, что можно сканировать до 20 га в час;
- точно определить пожароопасные или горящие участки;
- использовать архивы карт много лет, накапливая опыт. Пожароопасные участки практически не изменяются со временем.

Для тушения степных пожаров используется пожарная техника на гусеничном или колесном ходу. Она обладает широким спектром действия, имеет несколько видов. Каждый вид специальной пожарной техники на гусеничном ходу способен решать большое количество сложных задач. Для этого используются различные виды огнетушащих веществ. В основном это вода и пена, но в предложенной авторами модернизированной машине дополнительно будут использоваться огнетушащие порошки и газы. Для подачи каждого из этих веществ в очаг пожара необходимо специальное пожарное оборудование.

Пожарное оборудование предназначено для тушения пожаров различной сложности лафетным и ручными стволами, а также для забора и хранения воды и раствора пенообразователя, подачи воды с определенным расходом, орошения кабины во время тушения пожара.

После анализа нескольких прототипов, а также изменения технических и компоновочных характеристик основных элементов оборудования предложено рациональное решение (ноу-хау) для тушения пожаров степных и на хлебных массивах — трактор-грунтомет-полосопрокладыватель. Комплекс технических решений включает в себя доработку собственно грунтомета, позволяющего частично отделять сухую горючую

растительную фракцию от минеральной. Кроме того, было установлено, что повысить эффективность многофункционального гусеничного или колесного робототехнического комплекса можно также за счет элементов навигационных систем (геопозиционирования) и мониторинга на основе систем автоматического управления процессами. Предполагается также, что усовершенствованный колесный или гусеничный трактор-грунтомет-полосопрокладыватель, снабженный геонавигационной системой, может использоваться и для предупреждения ландшафтных пожаров, для активного тушения кромки степного или лесного низового пожаров с помощью минерализованного слоя почвогрунта и с минимальным объемом сухой горючей растительной фракции.

Основные элементы устройства представлены на рис. 4. Трактор (1) с ограждающим контуром (2) имеет в своем составе раму, механизм навески (3), волнообразносферические диски, образующие измельченный почвенный вал перед фрезами-метателями, установленными на уровне дна борозды, опорные колеса, регулирующие уровень дна борозды, привод (4) грунтомета-полосопрокладывателя (5), ковш-толкатель (6) для перерезания корней деревьев и защиты фрез-метателей от крупных препятствий, опорные цельнометаллические колеса для ограничения величины заглубления фрез-метателей.

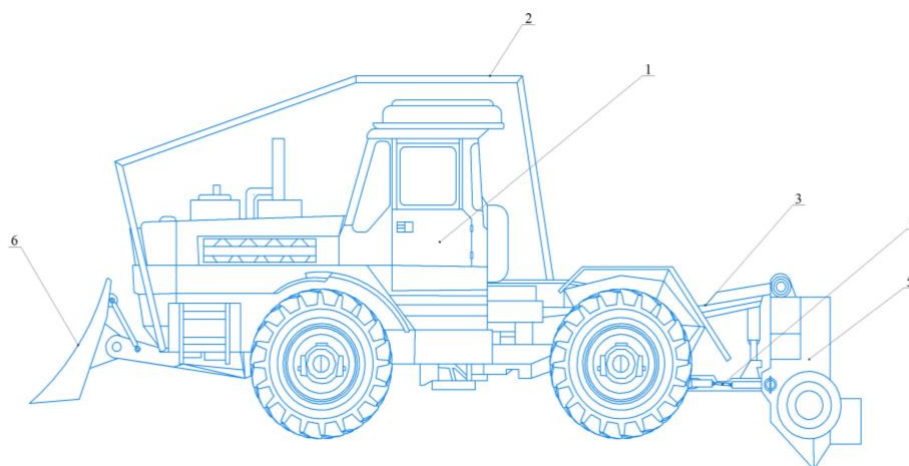


Рис. 4. Колесный трактор с навесным оборудованием — грунтометом-полосопрокладывателем

Защитный кожух (ноу-хау) состоит из двух основных частей — собственно защитного кожуха и почвопровода, выполненного с возможностью изменения его положения и отделения горючей растительной фракции. При этом защитный кожух представляет собой часть поверхности цилиндра вокруг фрез-метателей, нижняя половина поверхности защитного кожуха отсутствует, предоставляя возможность забора необходимого объема измельченного почвогрунта, а верхняя часть переходит в эллиптическую или цилиндрическую поверхность минерало-почвопровода, имеющего отвод для сухой растительной фракции. Положение и другие геометрические характеристики минерало-почвопровода могут изменяться (в том числе автоматически) с помощью механизма регулировки угла его установки посредством блока управления, гидронасосов и ряда гидроцилиндров из кабины мобильного транспортно-энергетического средства (трактора, автомобиля).

Проблема обеспечения пожарной безопасности в степной местности всегда будет актуальной. Для совершенствования процесса организации тушения пожаров степных и на хлебных массивах необходимо проводить множество мероприятий, не ограничиваясь лишь применением тяжелой специальной, строительной, сельскохозяйственной техники для ликвидации пожаров и их последствий.

Авторами были рассмотрены и другие ситуации, требующие применения специальной техники, в качестве которой изучались различные машины, хорошо показавшие себя при тушении природных и техногенных пожаров. В результате было определено, что такую технику можно широко применять как при тушении пожаров степных и на хлебных массивах, так и при возгораниях на складах удобрений.

Для расчета эффективности применения специальной, строительной, сельскохозяйственной техники при пожарах степных и на хлебных массивах выделены ее тактико-технические характеристики и определены возможности.

Результаты исследования. Важнейшими условиями обеспечения пожарной безопасности степных и хлебных массивов наряду с социальным являются технические и экологические.

Для оценки эффективности применения усовершенствованной специальной, строительной, сельскохозяйственной техники при рассматриваемых геоэкологических пожарах используют аналитические и моделирующие методы исследования⁴ [6, 7].

На примере среднестатистического пожара на хлебных массивах применим модельный расчет условия надежного блокирования степных пожаров.

Примем условную ситуацию, в которой очаг горения располагается возле объекта защиты. Допустим, что на хлебном массиве находится около 200 пожароопасных точек. Расстояние от очага горения до места блокирования — 20 метров. Скорость перемещения носителя очага горения — в пределах от 3 до 30 м/мин. Поскольку плотность распределения полученных экспериментальным путем данных составила не более 5 %, было принято решение о представлении данного массива аппроксимирующей функцией. Графическая интерпретация представлена на рис. 5 и 6.

С применением принципов «защита расстоянием и временем» используем безразмерные скорость и время, риски для личного состава и персонала, занятого на мероприятиях по предупреждению и тушению степных пожаров и пожаров на хлебных массивах.

На графиках видно, что при увеличении скорости перемещения фронта пожара на хлебном массиве, обусловленной природными факторами, и времени оперативного обнаружения и реагирования возникает вероятность проникновения фронта пожара в критически опасные точки объекта защиты.

В данной модели не были рассмотрены такие сопутствующие факторы, как техническая готовность и состояние специальных огнетушащих средств, характер пожара, его изменяющиеся параметры. Они также способны оказывать влияние на вероятность успешного блокирования очага горения.

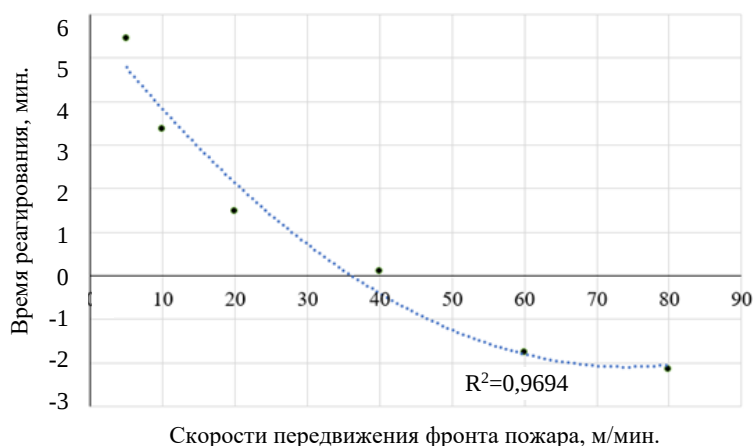


Рис. 5. Графическая зависимость полученных результатов по принципу «защита расстоянием»

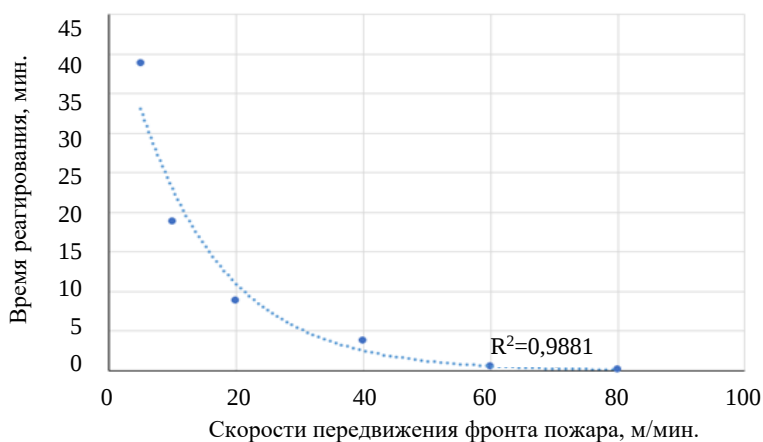


Рис. 6. Графическая зависимость полученных результатов по принципу «защита временем»

⁴Успенский, И. А. Анализ инструментов разработки цифровых двойников как средств оптимизации операций агропромышленного комплекса // Перспективные технологии в современном АПК России: традиции и инновации: мат. 72-й междунар. науч.-практ. конф. Рязань, 2021. С. 437–440.

Благодаря разработанным условиям надёжного блокирования степных пожаров и хлебных массивов, разработанных одним из авторов ранее [3], есть возможность на основе технологий геопозиционирования и мониторинга природных параметров определить управляемые параметры модели обеспечения пожарной безопасности.

Заключения и обсуждение. Результаты проведенных исследований показывают, что проблема пожаров степных и на хлебных массивах весьма актуальна. Это обусловлено высоким уровнем пожарных и экологических рисков разнородного происхождения [6]. Все это позволило сделать следующие выводы:

- в результате изучения статистики пожаров степных и на хлебных массивах в РФ установлено, что за последние 20 лет наблюдается их увеличение;

- на основе аналитических и моделирующих методов исследования доказано, что существуют эффективные решения для надёжного блокирования геоэкологических пожаров, учитывающие время реагирования, скорость распространения фронта пожара и другие факторы;

- кратко описаны устройство и компоновка основных элементов трактора-грунтомета-полосопрокладывателя (ноу-хау), позволяющие путем конструктивного анализа технически реализовать надёжную блокировку пожаров степных и на хлебных массивах;

- установлено, что повысить эффективность предупреждения и тушения пожаров можно на основе навигационных систем и автоматического управления процессами мониторинга во взаимосвязи с мобильным транспортно-энергетическим средством (трактором, автомобилем), снабженным устройством метания грунта.

Данное направление научных исследований является перспективным и имеет высокую инновационную и практическую ценность для совершенствования системы пожарной безопасности.

Список литературы

1. Шишов, С. Г. Характеристика ландшафтных пожаров и их влияние на пожаробезопасность объектов хранения боеприпасов / С. Г. Шишов // Молодежь. Образование. Наука. — 2019. — № 1 (14). — С. 178–204.
2. Andreev, S. S. Ecologic-geographical estimation of climatic comfortness of Rostov-on-Don / S. S. Andreev, E. S. Popova // European Journal of Natural History. — 2013. — No. 5 — P. 32-34.
3. Denisov, O. An innovative approach to the elimination of combustion foci at MSW landfills (on the example Rostov region) / O. Denisov, E. Andreeva // E3S Web of Conferences: Environmental Education and Training of Ecologists. — 2021. — Vol. 273(78). — 04006. [10.1051/e3sconf/202127304006](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127304006)
4. Bulygin, Yu. The role of hazardous factors of chemical and physical nature in welders' occupational risks management / Yu. Bulygin, E. Andreeva, D. Shoniya // E3S Web of Conferences: Environmental Education and Training of Ecologists. — 2021. — Vol. 273. — 12028. [10.1051/e3sconf/202127312028](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127312028)
5. Andreeva, E. S. Atmospheric air pollution as one of the factors of noncarcinogenic risk to the health of the human population in Rostov-on-Don / E. S. Andreeva, P. V. Klimov, K. S. Shtenske // Geography and Natural Resources. — 2021. — No. 42(1). — P. 32-36. <https://doi.org/10.1134/S1875372821010030>
6. Basilaia, M. Cosmoharmonic principles of environmental safety / M. Basilaia, I. Bogdanova, O. Dymnikova // E3S Web of Conferences. Innovative Technologies in Environmental Science and Education. — 2019. — Vol. 135. — 01079. [10.1051/e3sconf/201913501079](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913501079)
7. Пустовая, Л. Е. Анализ и оценка уровня безопасности портовых сооружений на примере склада хранения серы / Л. Е. Пустовая, В. А. Чебышева // Безопасность техногенных и природных систем. — 2021. — № 2. — С. 43–49.

Поступила в редакцию 18.12.2022

Поступила после рецензирования 09.01.2023

Принята к публикации 09.11.2023

Об авторах:

Денисов Олег Викторович, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), ovd63@mail.ru

Хохлова Кристина Владимировна, студентка кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), cristy2020@yandex.ru

Грибашов Максим Васильевич, магистрант кафедры «Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](#), gribashov10@gmail.com

Заявленный вклад соавторов:

К. В. Хохлова, М. В. Грибашов — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов; О. В. Денисов — научное руководство, выработка технических решений, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

МАШИНОСТРОЕНИЕ



Научная статья

УДК 004.413.4:[625.1/.5+004.9]

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69>

Интегральная оценка риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения

А. В. Панфилов , Н. Н. Николаев  , А. Р. Юсупов , А. А. Короткий 

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

 nnneks@yandex.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время техническое состояние канатов машин на канатной тяге оценивается периодически согласно нормативной документации. При этом применяются методы визуально-инструментального контроля, которые зависят от навыков и физических возможностей (зрения) персонала, выполняющего работы. Единая система непрерывной оценки технического состояния по совокупности факторов, не зависящая от человеческого фактора, отсутствует. В результате возникают аварийные ситуации даже при выполнении всех регламентных работ в срок. Для исправления этой ситуации предлагается использование системы компьютерного зрения и нейронных сетей, позволяющей по совокупности обнаруженных и идентифицированных дефектов определять его пригодность к дальнейшей эксплуатации по уровням риска с интерпретацией их результатов в цветовую гамму: зеленый — приемлемый, желтый — повышенный, красный — высокий. Цель работы — предложить интегральный метод оценки риска эксплуатации машин с канатной тягой при обнаружении дефектов и их сочетаний в стальном канате с использованием компьютерного зрения при исключении влияния человеческого фактора.

Материалы и методы. Обучение нейронной сети производилось на основе статистических данных дефектов, полученных по результатам технических освидетельствований машин с канатной тягой, на участках каната, кратных его шести и тридцати номинальным диаметрам по ГОСТ 33 718. Индексация рисков в цветовую гамму осуществлялась по ГОСТ 55 234.3 для выработки стратегии технического обслуживания стальных канатов. На программный код нейронной сети получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Нейронная сеть обрабатывает данные визуально-измерительного контроля на основе компьютерного зрения.

Результаты исследования. Создана система интегральной оценки риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения, позволяющая своевременно обнаруживать дефекты стальных канатов, оценивать существующий риск дальнейшей эксплуатации и давать рекомендации специалистам эксплуатирующих организаций в режиме реального времени. Это позволит резко снизить риск аварий, травмирования и гибели людей на объектах, использующих стальные канаты.

Обсуждение и заключения. Предлагаемая система интегральной оценки риска может быть применена в любом объекте с применением канатной тяги. Это лифты различного назначения, фуникулеры, канатные дороги, краны и многие другие машины. Следует отметить, что предполагаемая коммерческая стоимость системы является невысокой, следовательно, система доступна широкому кругу потребителей.

Ключевые слова: интегральная система, оценка риска, стальной канат, компьютерное зрение, нейронная сеть, рекомендательная система.

Благодарности. Авторы выражают признательность коллегам из ДГТУ за помощь в разработке системы; благодарность Фонду содействия инновациям за финансовую поддержку исследования.

Для цитирования. Интегральная оценка риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения / А. В. Панфилов, Н. Н. Николаев, А. Р. Юсупов, А. А. Короткий // Безопасность техногенных и природных систем. — 2023. — Т. 1, №1. — С. 56–69. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69>

© Панфилов А. В., Николаев Н. Н., Юсупов А. Р., Короткий А. А., 2023

Original article

Integral Risk Assessment in Steel Ropes Diagnostics Using Computer Vision

Aleksey V. Panfilov , Nikolay N. Nikolaev ✉, Aleksandr R. Yusupov , Anatoliy A. Korotkiy 

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ nnnks@yandex.ru

Abstract

Introduction. Currently, the technical condition of ropes of cable-working machines is evaluated periodically according to regulatory documentation. At the same time, methods of visual and instrumental control are used, which depend on the skills and physical capabilities (vision) of the personnel performing the work. There is no unified system of continuous assessment of the technical condition based on a set of factors that does not depend on the human factor. As a result, emergencies occur even when all routine maintenance is carried out on time. To correct this situation, it is proposed to use a computer vision system and neural networks, which allows determining its suitability for further operation by risk levels based on the totality of detected and identified defects, with the interpretation of their results in the color scheme: green — acceptable, yellow — increased, red — high. The work objective is to propose an integral method for risk assessment of operating machines with rope traction when defects and their combinations are detected in a steel rope using computer vision while excluding the influence of the human factor.

Materials and Methods. Training of the neural network was carried out on the basis of statistical data of defects obtained from the results of technical inspections of machines with rope traction, on sections of the rope, multiples of its six and thirty nominal diameters according to GOST 33 718. Indexing of risks in the color scheme was carried out according to GOST 55 234.3 to develop a strategy for steel ropes maintenance. A certificate of registration of a computer program was obtained for the neural network program code. The neural network processes visual and measurement control data based on computer vision.

Results. An integrated risk assessment system has been created for the diagnosis of steel ropes using computer vision, which allows you to detect defects in steel ropes timely, assess the existing risk of further operation and give recommendations to specialists of operating organizations in real time. This will dramatically reduce the risk of accidents, injury and death of people at facilities using steel ropes.

Discussion and Conclusion. The proposed integrated risk assessment system can be applied in any facility that uses rope traction. These are elevators for various purposes, funiculars, cable cars, cranes and many other machines. It should be noted that the estimated commercial cost of the system is low; therefore, the system is available to a wide range of consumers.

Keywords: integrated system, risk assessment, steel rope, computer vision, neural network, recommendation system.

Acknowledgements. The authors would like to thank their colleagues from DSTU for their help in developing the system and to express gratitude to the Innovation Promotion Fund for financial support of the research.

For citation. A. V. Panfilov, N. N. Nikolaev, A. R. Yusupov, A. A. Korotkiy. Integral Risk Assessment in Steel Ropes Diagnostics Using Computer Vision. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2023, no. 1, pp. 56–69. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-56-69>

Введение. Своевременная оценка технического состояния объектов, непосредственно отвечающих за безопасность выполнения различных технологических операций является важнейшей задачей. Это позволит сократить или исключить аварийные ситуации с травмированием, гибелью людей и повреждением материальных объектов [1, 2]. К таким критически важным с точки зрения оценки риска техническим объектам относятся: лифты (пассажирские, больничные и грузовые); канатные дороги (пассажирские и грузовые); шахтные подъемные установки; нефте- и газодобывающие буровые установки; грузоподъемные краны; тали; <https://www.bps-journal.ru>

судовые подъемные устройства; скиповые подъемники; канатные механизмы оффшорных платформ; механизмы на морских трубоукладчиках и другие.

Для осуществления непрерывного контроля параметров технического состояния стальных канатов разработана рекомендательная система интегральной оценки риска продолжения работы стальных канатов в механизмах с использованием и интерпретацией данных системы компьютерного зрения.

Актуальность проблемы подтверждается имеющейся статистикой аварий на объектах, использующих канатную тягу, которые возникают, несмотря на имеющуюся систему периодических осмотров и дефектоскопии стальных канатов [3–5].

Цель работы — предложить интегральный метод оценки риска эксплуатации машин с канатной тягой при обнаружении дефектов и их сочетании с использованием компьютерного зрения в стальном канате при проведении регламентных работ.

Задачи, решаемые для достижения поставленной цели в ходе данного исследования:

1. Описать существующие регламенты по визуально-измерительному контролю стальных канатов на машинах с канатной тягой.
2. Предложить метод визуально-измерительного контроля с использованием компьютерного зрения в стальном канате.
3. Показать, что компьютерное зрение является технологией искусственного интеллекта.
4. Дать определение интеллектуальной системе поддержки принятия решений (ИСППР – IDSS) применительно к предложенному методу оценки риска эксплуатации машин с канатной тягой при обнаружении дефектов и их сочетании с использованием компьютерного зрения в стальном канате при проведении регламентных работ.
5. Применить один из известных методов риск-анализа для интегральной оценки технического состояния стальных канатов.
6. Предложить алгоритм и вычислительную процедуру для интегральной оценки риска эксплуатации стального каната с наличием дефектов на фиксированной длине равной шести и тридцати номинальных диаметров каната.

Отправной точкой создания продукта явились возникающие проблемы с лифтами (и другими машинами на канатной тяге) и возможность применения аналитики видеоинформации, которая основана на алгоритмах глубокого обучения по распознаванию образов. Это позволит значительно повысить объективность получаемой информации о параметрах технического состояния стального каната, уравнивающих устройств, креплений концов заделок и обеспечить уровень безопасности процессов эксплуатации машин на канатной тяге, устраняя при этом человеческий фактор [6, 7].

Материалы и методы. Стальные канаты подвергаются ежесменным, периодическим и специальным осмотрам во всех типах подъемных сооружений. Документом, которым пользуется персонал при проведении ремонтных и обслуживающих работ, является инструкция по эксплуатации. При ее отсутствии необходимо пользоваться Правилами безопасности или ГОСТами.

Электромеханики по лифтам, крановщики, машинисты, слесари, электромонтеры и другие категории обслуживающего персонала осуществляют ежесменные визуальные осмотры стальных канатов периодически или непосредственно перед началом работы. Осмотры проводятся в следующем порядке:

1. Ознакомление с записями в журнале (журнале ежесменного осмотра лифта; вахтенном — для грузоподъемного крана; сменном журнале — для подвесных канатных дорог и др.).
2. Проведение осмотра навитых на барабан участков каната, а также пропущенных через канатопроводящий шкив, блок, опирающихся на башмаки, закрепленных в муфтах, коушах и зажимах.

У оператора (машиниста) подъемного сооружения имеется журнал, в которых заносятся результаты осмотров.

Периодичность дефектоскопии стальных канатов для конкретных подъемных сооружений и их периодичность приведена в таблице 1.

Таблица 1

Периодичность осмотров и дефектоскопии стальных канатов¹

№ п/п	Наименование подъемного сооружения	Назначение стального каната	Периодичность дефектоскопии (месяц)	Примечание
1	Краны грузоподъемные	грузовой	12	*
		стреловой	12	**
		тяговый	12	*
		оттяжка	36	**
2	Краны кабельные	несущий	последующая каждые 24	первая при пуске в эксплуатацию
		тяговый	12	
		грузовой	12	
		оттяжка	36	
		канаты поддержек подвески кабелей	не подвергаются	
		удержание крана (опоры)	не подвергаются	
3	Подъемники и лебедки для подъема людей	грузовой	6	
		тяговый	12	
4	Съемные грузозахватные органы		не подвергаются	
5	Съемные грузозахватные приспособления		не подвергаются	
6	Тали электрические	грузовой	12	*
7	Лифты	тяговый	6	
		хвостовой	не подвергаются	
8	Подъемники (вышки)		не подвергаются	
9	Подвесные пассажирские (грузовые) канатные дороги	несущий, тяговый, тягово-несущий	вторая - через 36, последующая каждые 12	первая при пуске в эксплуатацию
		натяжной	не подвергаются	
10	Наклонные рельсово-канатные подъемники (фуникулеры)	тяговый	вторая - через 36, последующая каждые 12	первая при пуске в эксплуатацию
		натяжной (хвостовой)	не подвергаются	
		предохранительный	не подвергаются	

Примечание: малокрытая канаты, независимо от назначения, подлежат дефектоскопии с периодичностью 12 месяцев;

* при интенсивной эксплуатации в условиях агрессивной среды и повышенной температуры;

** для канатов, эксплуатирующихся без замены на кранах с истекшим сроком службы.

Правила¹ требуют проведения периодического (в отдельных случаях — ежедневного) визуально-измерительного контроля (ВИК) стальных канатов с обнаружением внешних дефектов, сведения о которых заносятся в журнал осмотров.

¹ Об организации безопасного использования и содержания лифтов, подъемных платформ для инвалидов, пассажирских конвейеров (движущихся пешеходных дорожек), эскалаторов, за исключением эскалаторов в метрополитенах / Правительство Российской Федерации // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/436745439?section=text> (дата обращения: 23.01.2023).

Дефекты в стальных канатах возникают в результате:

- внешних воздействий с механическим оборудованием или внешней средой в шахте лифта, в том числе при образовании дугового электрического разряда;
- ненадлежащего качества поставляемого стального каната как комплектующего изделия;
- ненадлежащего качества монтажа стальных канатов;
- неисправности механических частей лифта, индикатором которых является канат.

Можно констатировать, что их дефекты стальных канатов являются «индикатором» технического состояния всего механического оборудования подъемного сооружения, а именно: износа ручья шкива; проскальзывания каната на шкиве, в том числе в результате нанесения излишней смазки; перекоса крепления лебедки; люфтов в элементах передаточных механизмов привода и прочее [8–12]. Возможные неисправности механических частей лифта в зависимости от браковочных показателей представлены в таблице 2.

Предложен метод ВИК, позволяющий осуществить интегральную оценку технического состояния стального каната, реализованный в виде программно-аппаратного комплекса², являющегося вычислительной рекомендательной системой принятия решения для обслуживающего персонала при выполнении ими работ по техническому обслуживанию машин с канатной тягой. Это позволяет получить необходимый уровень безопасности, при этом устраняется субъективность человеческого фактора, а именно, физиологические ограничения, связанные со зрением.

Предложенный метод предусматривает создание, развитие и внедрение искусственного интеллекта, а именно комплекса технологических решений, которые позволяют имитировать когнитивные функции человека (зрение и самообучение), включающие в себя поиск решений по идентификации выявленных дефектов стальных канатов с результатами интеллектуальной деятельности человека.

Таблица 2

Возможные неисправности механического оборудования лифта в зависимости от типов дефектов

№ п/п	Браковочный показатель	«Индикатор» возможной неисправности
1	Обрывы наружных проволок	– Износ ручья шкива – Перекос канатопроводящего шкива при монтаже или техническом обслуживании – Соприкосновение с внешними элементами при движении в шахте – Ненадлежащее качество поставляемого стального каната
2	Поверхностный износ каната	– Износ ручья шкива – Перекос канатопроводящего шкива при монтаже или техническом обслуживании
3	Поверхностная коррозия	Воздействие факторов возникновения коррозии (кислородного, электрохимического, химического)
4	Местное уменьшение диаметра каната	– Ненадлежащее качество поставляемого стального каната – Повреждение сердечника – Повреждение внутренних прядей
5	Местное увеличение диаметра каната	– Ненадлежащее качество поставляемого стального каната – Разбухание органического сердечника от избытка влаги
6	Волнистость	– Ненадлежащее качество поставляемого стального каната – Дефекты монтажа или ненадлежащего технического обслуживания уравнивающих устройств, мест заделок их концов
7	Температурное воздействие (электрический дуговой разряд или удар молнии)	Воздействие электрического тока при монтаже, ненадлежащего технического обслуживания и в процессе эксплуатации
8	Кручение	– Перегрузка – Неправильная запасовка

² Способ визуально-измерительного контроля стального каната : патент 2775348 Рос. Федерация : D07B 1/00 ; B66B 7/1215 ; G05B 99/00 / А. А. Короткий [и др.]. № 2021107842 ; заявл. 23.03.2021 ; опубл. 29.06.2022, Бюл. № 19. 16 с.

№ п/п	Браковочный показатель	«Индикатор» возможной неисправности
		– Неправильная укладка нового каната на барабан
9	Удлинение (остаточное)	– Ненадлежащее качество поставляемого стального каната – Перегрузка – Повреждение сердечника – Повреждение внутренних прядей
10	Дефекты уравнивающих устройств, мест заделок их концов	Дефекты монтажа и ненадлежащего технического обслуживания

К технологиям искусственного интеллекта, в соответствии с «Национальной стратегией...»³ (подпункт «а» пункта 5), относятся технологии, основанные на использовании компьютерного зрения и интеллектуальной поддержки принятия решений.

Под искусственным интеллектом следует понимать комплекс технологических решений, который позволяет имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение и поиск решений без заранее заданного алгоритма) и выполнять конкретные задачи с результатами, сопоставимыми с результатами интеллектуальной деятельности человека или превосходящими их.

Заявленный метод включает в себя комплекс технологических решений, состоящий из компьютерного зрения, информационно-коммуникационной инфраструктуры, программного обеспечения (в том числе, реализация методов машинного обучения), процессов и сервисов по обработке данных и поиску решений.

Для интегральной оценки технического состояния стального каната применена интеллектуальная система поддержки принятия решений (ИСППР — IDSS), использующая методы искусственного интеллекта (ИИ) (рис. 1, 2).

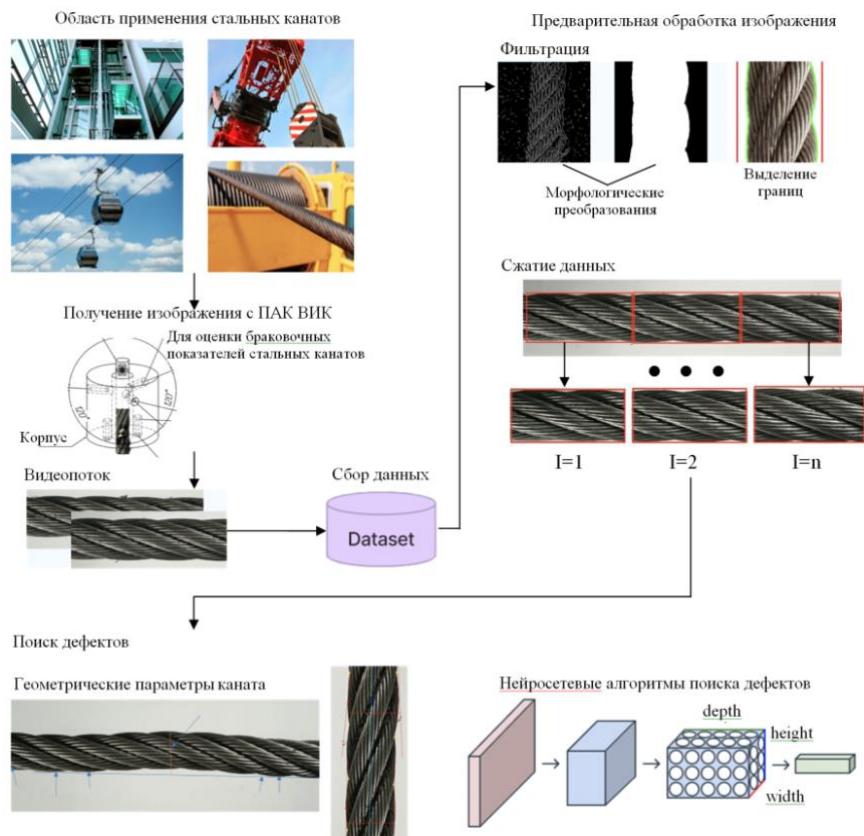


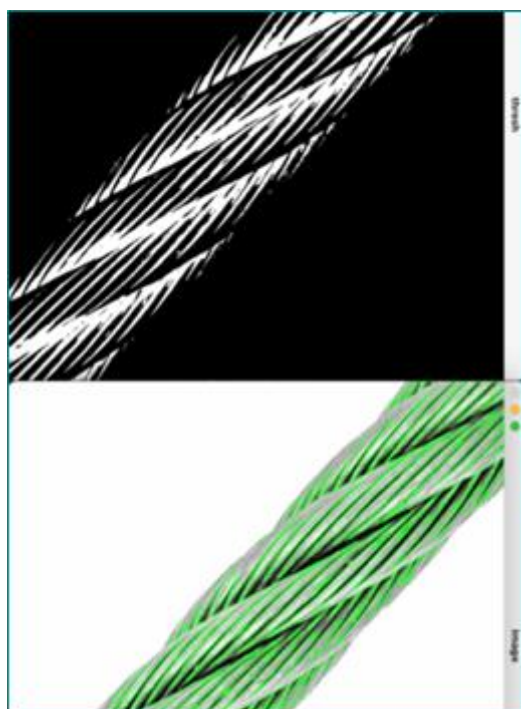
Рис. 1. Функциональная схема метода визуально-измерительного контроля стального каната

³ О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации (вместе с «Национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года») / Президент Российской Федерации // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/563441794/titles/64U0IK> (дата обращения: 23.01.2023).

Интеллектуальная система поддержки принятия решений заменяет человека-консультанта. Она оказывает поддержку лицам, принимающим решения, путем сбора и анализа фактических данных по обнаруженным дефектам, дает предложения возможных вариантов действий и их оценку. Цель методов искусственного интеллекта, встроенных в интеллектуальную систему поддержки принятия решений, состоит в том, чтобы позволить компьютеру выполнять эти задачи, максимально имитируя человеческие возможности.

Предложенная реализации ИСППР (IDSS) основана на экспертных системах, которые кодируют знания и имитируют когнитивное поведение экспертов-людей, используя правила логики предикатов.

Экспертная система — это компьютерная система, имитирующая способность эксперта-человека принимать решения. Экспертные системы предназначены для решения сложных проблем путем рассуждения с помощью совокупности знаний, представленных в основном в виде правил «если-то», а не с помощью обычного процедурного кода. Экспертная система делится на две подсистемы — механизм вывода и базу знаний. База знаний представляет факты и правила. Механизм вывода применяет правила к известным фактам, чтобы вывести новые факты. Механизмы вывода могут также включать в себя возможности объяснения и отладки.



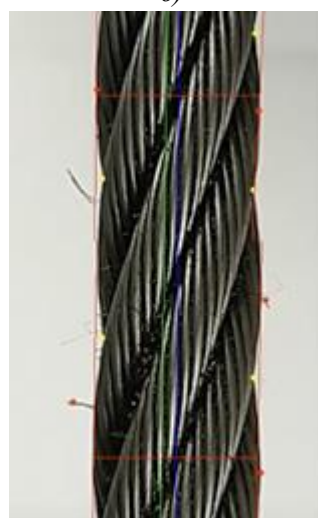
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Обнаружение дефектов средствами компьютерного зрения:

а — определение износа наружных проволок; б — обрыв проволок;

в — температурное воздействие; г — местное уменьшение / увеличение диаметра

Создаваемый метод позволяет автоматизировать процессы при оценке безопасности использования именно стального каната на машинах на канатной тяге. Это дает возможность предоставить пользователям (персоналу) визуальную рекомендательную систему принятия решения в виде веб-приложения, на которое не оказывает влияние человеческий фактор. Это обеспечивает рост безопасности и снижение затрат. Данный метод автоматизирует и объединяет два метода контроля: визуальный и инструментальный [14–16].

Экспертная система по оценке риска может быть реализована на основе известных методов, таких как⁴: метод Делфи (Delphi); анализ видов и последствий отказов (FMEA); анализ видов, последствий и критичности отказов (FMECA); техническое обслуживание на основе надежности (RCM); индексы риска; сценарный анализ; структурированный метод «Что, если?» (SWIFT); методы нечеткой логики и др.

Вне зависимости от применяемой методики, оценку рисков осуществляют с использованием матрицы оценки рисков или аналогичного инструмента (например, см. ГОСТ Р 58 771⁴ или ГОСТ Р 55 234.3⁵, или ГОСТ 12.0.230.5⁶).

Осями матрицы могут являться как вероятность и последствия риска, так и любые другие технические параметры механического оборудования, характеризующие их важность или критичность.

По результатам такой оценки риску, как правило, присваивают один из трех уровней — высокий (красный), средний (желтый) или низкий (зеленый).

Возможно увеличение количества уровней. Названия цветов приведены как часть наиболее распространенной схемы.

В рекомендациях по стандартизации⁷ также предусматривают использование цветовой гаммы при оценке риска.

Для оценки уровней риска и выработки стратегий технического обслуживания и выбраковки на основе рекомендательной системы принятия решений применим подход RIMAP — процедуры контроля технического состояния и обслуживания, основанные на риск-ориентированном подходе (рекомендован ГОСТ 55 234.3⁵). Подход позволяет успешно сочетать все известные методы оценивания риска и принятия решений.

Применение подхода RIMAP решает следующие задачи:

- определение опасностей;
- определение механизмов возникновения дефектов и отказов;
- определение вероятности отказа;
- определение последствий отказа;
- оценка уровня риска.

Главной опасностью для канатных систем является риск обрыва каната, а также разрушение мест заделки концов каната.

В таблице 3 представлены браковочные показатели стальных канатов и механизмы развития повреждений.

Далее необходимо определить вероятность отказа. Для этого требуются исходные данные по различным дефектам, указанным в таблицах 2 и 3.

⁴ ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска / НП «РусРиск»; Технический комитет по стандартизации ТК 010 «Менеджмент риска»; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200170253> (дата обращения: 23.01.2023).

⁵ ГОСТ Р 55234.3-2013. Практические аспекты менеджмента риска. Процедуры проверки и технического обслуживания оборудования на основе риска / АНО «НИЦ КД»; Технический комитет по стандартизации ТК 010 «Менеджмент риска»; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200108150> (дата обращения: 23.01.2023).

⁶ ГОСТ 12.0.230.5-2018. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Методы оценки риска для обеспечения безопасности выполнения работ / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии; Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200160465> (дата обращения: 23.01.2023).

⁷ Р 50.1.090-2014. Менеджмент риска. Ключевые индикаторы риска / НП «РусРиск»; Технический комитет по стандартизации ТК 010 «Менеджмент риска»; Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200120834> (дата обращения: 23.01.2023).

Таблица 3

Браковочные показатели стальных канатов и механизмы развития повреждений

Обозначение	Наименование вида дефекта	Нормы браковки согласно нормативно-технических документов	Механизмы развития повреждений
A (на длине 6d) B (на длине 30d)	Обрывы наружных проволок	Согласно руководству по эксплуатации каната (в зависимости от типа и марки)	Усталостный износ, механический износ, коррозия (кислородная, электрохимическая, химическая)
C	Поверхностный износ каната	Уменьшение диаметра наружных проволок на 40 % и более	Механический износ
D	Поверхностная коррозия	Уменьшение диаметра каната на 7 % и более;	Коррозия (кислородная, электрохимическая, химическая)
E	Местное уменьшение диаметра каната	Уменьшение на 3 – 6 % диаметра каната от номинального	Повреждение сердечника, повреждение внутренних прядей
F	Местное увеличение диаметра каната	Увеличение на 3 -6 % диаметра каната от номинального	Разбухание органического сердечника от избытка влаги
G	Волнистость	При совпадении направления спирали волнистости с направлением свивки каната и равенства шага волнистости и шага свивки каната при $d_w \geq 1,08 d_k$ (где d_w и d_k , соответственно, диаметр волнистости и диаметр каната). В остальных случаях при $d_w \geq 1,33 d_k$	Изгиб в ручьях шкивов малых радиусов
H	Температурное воздействие	При обнаружении на поверхности каната сажи, обгорелости, характерного изменения цвета	Статический электрический разряд, удар молнии, нагрев
I	Кручение	1) При запасовке 1:1 — 0,5 оборота на 10 метров 2) При запасовке 2:1 — 0,5 оборота на 20 метров 3) Для канатов с органическим сердечником — 1 оборот на 10 метров	Перегрузка, неправильная запасовка, неправильная укладка нового каната на барабан
J	Удлинение (остаточное)	При остаточном удлинении более чем на 0,5 % рабочей длины после приработки	Перегрузка, повреждение сердечника, повреждение внутренних прядей
K	Дефекты уравнивающих устройств, мест заделок канатов	Отклонение положения и формы от первоначального расположения элементов	Перегрузка, износ деталей и элементов

Для получения достоверной выборки данных на основе имеющихся результатов дефектации канатов использован метод Монте-Карло, с помощью которого была сгенерирована выборка объемом 1000 участков каната, кратных его 6 номинальным диаметрам, позволяющая рассмотреть все сочетания и вариации дефектов. Оценка суммарной вероятности отказа по выборке выполнялась в соответствии с алгоритмом, представленном

на рис. 3. Полученная выборка была применена для обучения нейронной сети с целью реализации метода индексации рисков подхода RIMAP.

Поскольку выходные данные имеют дискретный характер, то нейронная сеть должна решать задачу классификации. В качестве типа нейронной сети выбран многослойный персептрон.

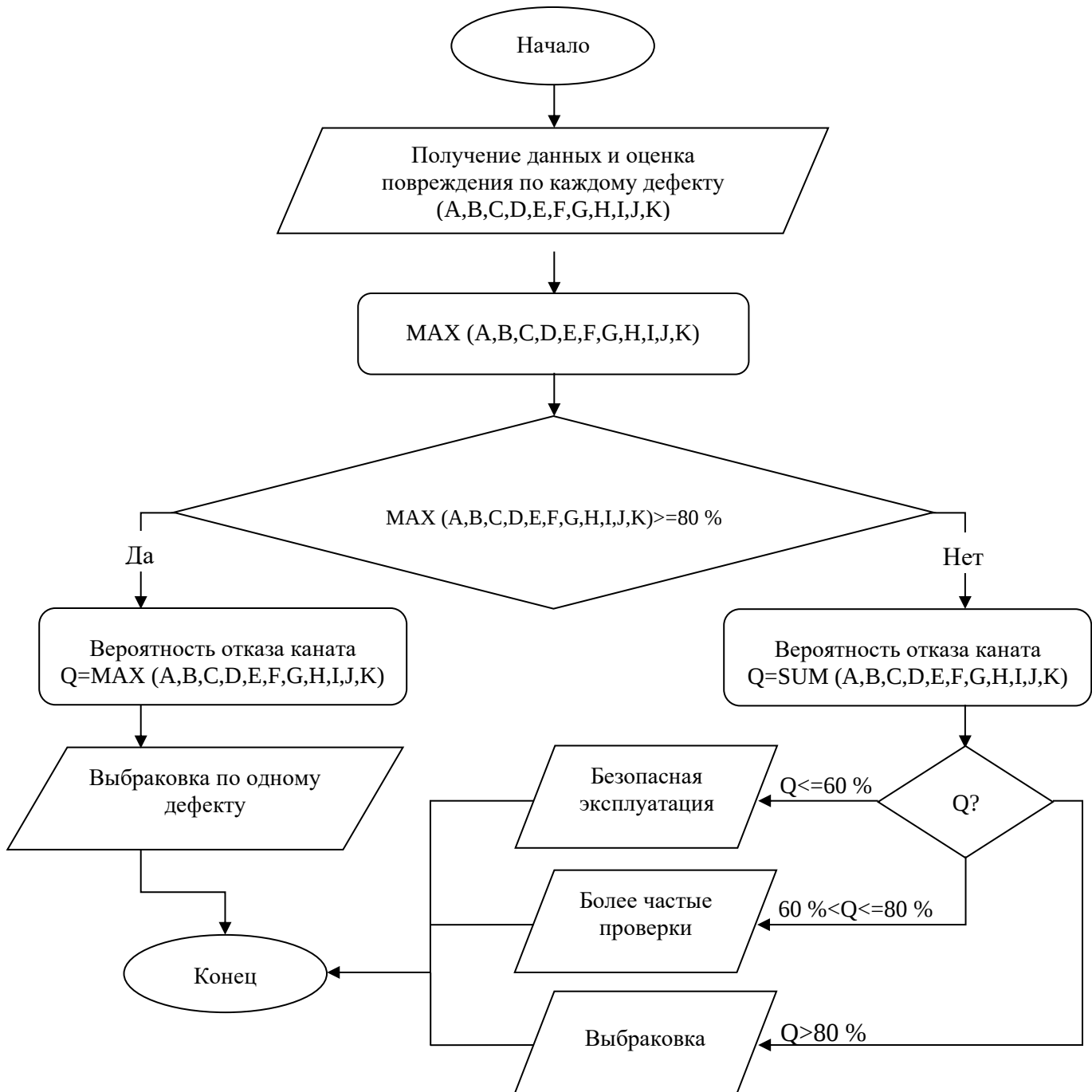


Рис. 3. Алгоритм оценки суммарного повреждения участка каната

В ходе обучения было получено 20 нейронных сетей, из которых автоматически было отобрано пять лучших (рис. 4).

Среди полученных нейронных сетей можно выделить сеть MLP 11–9–3, имеющую наилучшую производительность на тестовой выборке 96 %, а по обучающей и контрольной выборкам — 98 %.

Summary of active networks (Spreadsheet in Risk_Estimation)								
Index	Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
1	MLP 11-4-3	95,85714	95,33333	98,00000	BFGS 36	SOS	Tanh	Identity
2	MLP 11-14-3	96,28571	94,66667	96,00000	BFGS 50	SOS	Logistic	Tanh
3	MLP 11-7-3	96,42857	95,33333	98,00000	BFGS 16	SOS	Exponential	Logistic
4	MLP 11-14-3	97,57143	94,66667	97,33333	BFGS 92	SOS	Logistic	Identity
5	MLP 11-9-3	98,14286	96,00000	98,00000	BFGS 155	SOS	Logistic	Tanh

Рис. 4. Наилучшие нейронные сети из 20 обученных

Это наилучшие показатели, поэтому для дальнейшей работы в интеллектуальной системе поддержки принятия решений будем использовать указанную нейронную сеть. Указанная нейронная сеть имеет 11 нейронов во входном слое (по количеству дефектов на входе), 9 нейронов в скрытом слое, а также 3 нейрона в выходном слое (по количеству возможных оценок риска дальнейшей эксплуатации стального каната). В качестве функции активации нейронов скрытого слоя применена логистическая функция, а для выходного слоя — тангенциальная функция.

Анализ чувствительности нейронной сети MLP 11–9–3 к изменению влияющих показателей износа показал, что наибольшее влияние оказывают изменения показателей J (удлинение), I (кручение), E (местное уменьшение диаметра каната) и G (волнистость) (рис. 5).

Sensitivity analysis (Spreadsheet in Risk_Estimation)											
Networks	Samples: Train										
	J	I	E	G	A	F	K	H	C	D	B
1.MLP 11-4-3	4,09029	3,78539	3,538596	2,999158	2,547528	2,325594	1,647709	1,675373	1,173743	1,138040	1,004637
2.MLP 11-14-3	3,10473	2,80809	2,788032	2,397576	1,973580	1,837489	1,595495	1,540505	1,102962	1,130396	1,012868
3.MLP 11-7-3	3,28691	2,97724	2,869449	2,475196	2,139719	2,020911	1,700607	1,700192	1,151866	1,085886	1,003372
4.MLP 11-14-3	7,30974	6,61641	6,316661	5,374687	4,347702	3,728140	2,721447	2,575235	1,506436	1,705318	1,137510
5.MLP 11-9-3	11,24972	10,23045	9,817238	8,400586	7,023844	5,798566	5,965579	5,509112	2,803276	2,617175	1,092058
Average	5,80828	5,28351	5,065995	4,329440	3,606475	3,142140	2,726167	2,600083	1,547656	1,535363	1,050089

Рис. 5. Анализ чувствительности нейронной сети MLP 11–9–3

На программный код нейронной сети получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ⁸.

Результаты исследования. Создана система интегральной оценки риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения, позволяющая своевременно обнаруживать дефекты стальных канатов, оценивать существующий риск дальнейшей эксплуатации и давать рекомендации специалистам эксплуатирующих организаций в режиме реального времени. Это позволит резко снизить риск аварий, травмирования и гибели людей на объектах, использующих стальные канаты.

Данная система является ядром продукта — программно-аппаратный комплекс (ПАК) (рис. 6) автоматизации процессов оценки безопасности использования стальных канатов, дефектов уравнивающих устройств и мест заделок их концов на машинах с применением канатной тяги, который представляет собой визуальную рекомендательную систему принятия решения для специалистов. При этом устраняется человеческий фактор, что обеспечивает повышение безопасности и снижение затрат.

Основное функциональное назначение ПАК состоит в автоматическом обнаружении дефектов стальных канатов, уравнивающих устройств и креплений концов заделок канатов специальными оптическими средствами (фото- и видеофиксации) с последующей обработкой полученной цифровой информации методом фото- и видеоаналитики на основе машинного обучения, в том числе, интегральной оценкой пригодности к дальнейшей эксплуатации методами риск-анализа, которая транслируется в цветовую гамму оценки риска на мобильные устройства пользователей.

⁸ Интегральная оценка технического состояния стального каната : прогр. для ЭВМ. Свид. № 2022683712 / А. А. Короткий [и др.]; Инженерно-консультационный центр «Мысль». № 2022683761 ; заявл. 07.12.2022 ; опубл. 07.12.2022, Бюл. № 12.

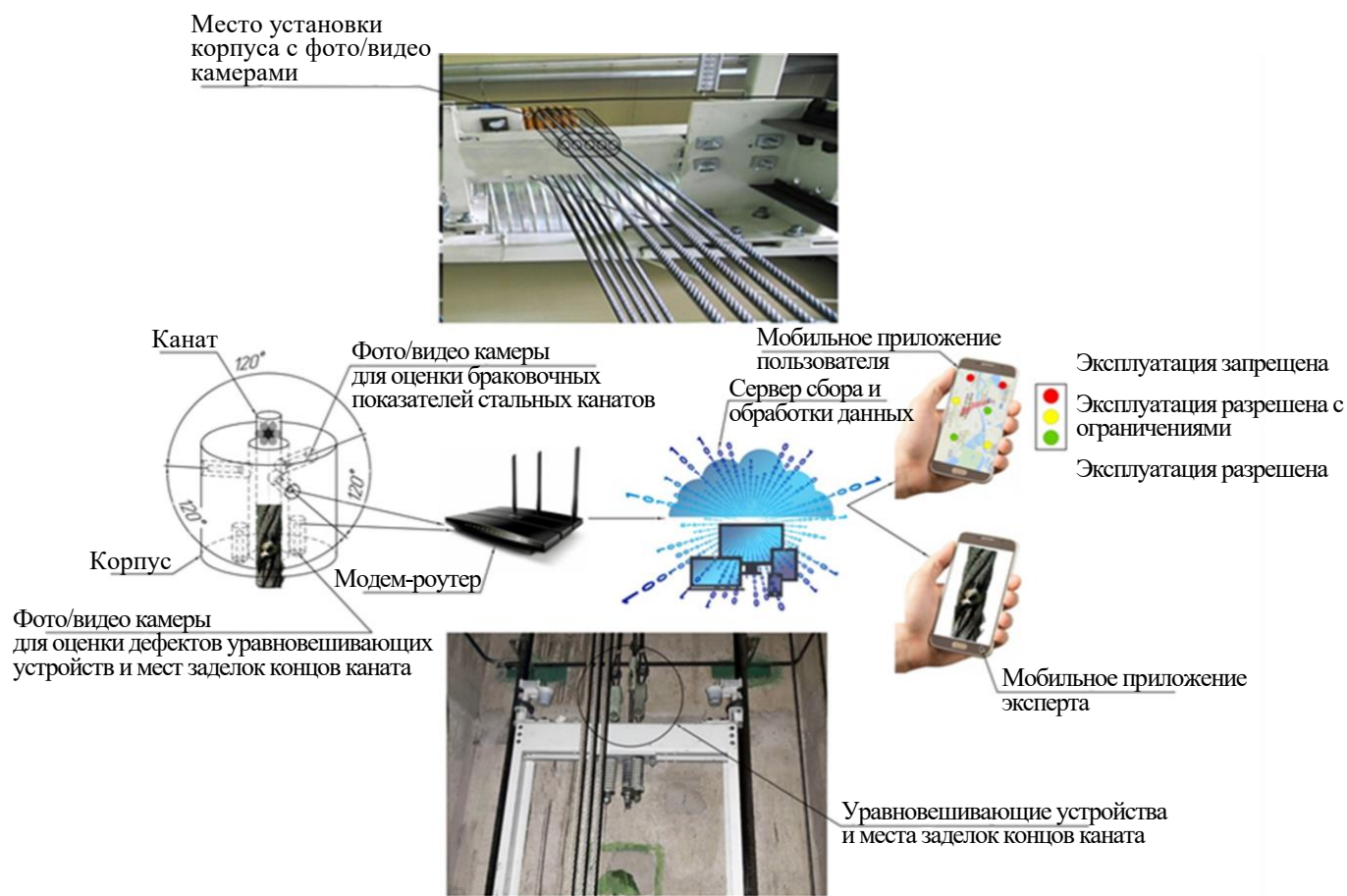


Рис. 6. Функциональная схема ПАК

Обсуждение и заключения. Интегральная оценка риска при диагностике стальных канатов с использованием компьютерного зрения с учетом ее преимуществ перед традиционной системой визуально-инструментального контроля будет востребована отраслью машин на канатной тяге. Этот рынок является целевым для использования на нем создаваемого авторами продукта. Например, количество пассажирских лифтов, находящихся в эксплуатации на территории Российской Федерации, составляет 450 тыс. ед. Обслуживанием лифтов занимаются более 50 тыс. организаций. На каждый лифт необходима аппаратная часть комплекса, т.е. объем рынка потребителей составляет 450 тыс. шт. Программная часть необходима каждой обслуживающей организации, т.е. 50 тыс. лицензий. Мобильное приложение необходимо специалистам каждой обслуживающей организации, в которой, как минимум, должны быть не менее трех специалистов, т.е. 150 тыс. лицензий. Учитывая технологические и экономические преимущества (цена порядка 55 тыс. рублей), разработанная система займет прочную позицию в отрасли машин на канатной тяге.

Список литературы

1. Journey Safety Assessment to Urban Aerial Ropeways Transport Systems Based on Continuous Inspection During Operation / R. Martinod, D. Estepa, C. Paris, A. Trujillo // Journal of Transportation Safety & Security. — 2015. — No. 7. — P. 279–290. [10.1080/19439962.2014.942018](https://doi.org/10.1080/19439962.2014.942018)
2. Ferrarese M. Demand, business profitability and competitiveness in the cableway system: A multidimensional framework / M. Ferrarese, E. Loner, M. Pulina // Research in Transportation Economics. — 2021. — Vol. 90. — 101041. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2021.101041>
3. Failure analysis of a ropeway accident focussing on the wire rope's fracture load under lateral pressure / G. Piskoty, Ch. Affolter, M. Sauder, M. Nambiar, B. Weisse // Engineering Failure Analysis. — 2017. — Vo. 82. — 648–656. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.05.003>

4. Failure analysis of the journal bearing pulley of the cargo cable way / P. Peterka, J. Krešák, M. Vojtko, M. Mantič // Engineering Failure Analysis. — 2020. — Vol. 111. — 104329. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104329>
5. Mapelli, C. Failure analysis of a cableway rope / C. Mapelli, S. Barella // Engineering Failure Analysis. — 2009. — Vol. 16, No. 5. — 1666–1673. [10.1016/j.engfailanal.2008.12.011](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.12.011)
6. Панфилов, А. В. Рекомендательные системы безопасности для риск-ориентированного подхода / А. В. Панфилов, В. В. Дерюшев, А. А. Короткий // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 48–55.
7. Система адаптивного дистанционного мониторинга и контроля эксплуатации опасных объектов на основе риск-ориентированного подхода / А. В. Панфилов, О. А. Бахтеев, В. В. Дерюшев, А. А. Короткий // Безопасность техногенных и природных систем. — 2020, № 2. — С. 19–29. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2020-2-19-29>
8. О критериях и нормах браковки канатов пассажирских канатных дорог / А. В. Панфилов, А. А. Короткий, Б. Ф. Иванов, Э. А. Панфилова // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. — 2021. — №1. — С. 53–65.
9. Dynamic behavior of ropeway string / P. J. Shakti, I. Mohd, B. Subbaratnam, K. Naresh // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 998 — 2020 — 012068. [10.1088/1757-899X/998/1/012068](https://doi.org/10.1088/1757-899X/998/1/012068)
10. Modelling and analysis of helical ropeway string / M. A. Kattimani, M. Ibrahim, M. A. Ahmed, M. A. Salam // Journal of Emerging Technologies and Innovative Research. — 2022. — Vol. 9, No. 6, — P. 357–365. — URL: https://www.researchgate.net/publication/361612084_MODELING_AND_ANALYSIS_OF_HELICAL_ROPEWAY_STRING
11. Fontanari, V. Study of the lightning damage produced in a full-locked wire rope of an aerial cableway / V. Fontanari, C. Menapace, E. Pedrotti // Engineering Failure Analysis. — 2019. — Vol. 103. — P. 530–539, [10.1016/j.engfailanal.2019.05.002](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.05.002)
12. Experimental prediction of wire rope damage by energy method / A. Wahid, N. Mouhib, A. Ouardi, F. Sabah, H. Chakir, M. E. Lghorba // Engineering Structures. — 2019 — Vol. 201. — 109794. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109794>
13. Prediction of fatigue fractures diffusion on the cableway haul rope / P. Peterka, P. Kačmár, J. Krešák, J. Šimoňák, P. Bindzár, D. Mitřík // Engineering Failure Analysis. — 2016. — Vol 59. — P. 185–196, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.10.006>
14. Collini, L. MRT detection of fretting fatigue cracks in a cableway locked coil rope / L. Collini, F. Degaspero // Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation. — 2014. — Vol. 2. — P. 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.csndt.2014.09.001>
15. A New Detection Method of the Surface Broken Wires of the Steel Wire Rope Using an Eddy Current Differential Probe / Kou Yanfei, Guo Jiujiang, Li Jingjing, Jiao Shaoni, Liu Jiquan, Yan Zhiwei, Zhu Kun // IEEE Access. — 2022. — Vol. 10. — P. 63619– 63625. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3183097>
16. Kumar, K. Effect of Key Parameters on Fretting Behaviour of Wire Rope / K. Kumar, D. Goyal, S. S. Banwait // Archives of Computational Methods in Engineering. — 2020. — No. 27, — P. 549–561, <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09326-y>

Поступила в редакцию 11.01.2023

Поступила после рецензирования 16.01.2023

Принята к публикации 16.01.2023

Об авторах:

Панфилов Алексей Викторович, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика», Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ScopusID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), panfilov@ikcmvsl.ru

Николаев Николай Николаевич, доцент кафедры «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ResearcherID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), [ScopusID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), nneks@yandex.ru

Юсупов Александр Рашидович, старший преподаватель кафедры «Робототехника и мехатроника», Донского государственного технического университета (РФ, 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), temple_black@mail.ru
<https://www.bps-journal.ru>

Короткий Анатолий Аркадьевич, заведующий кафедрой «Эксплуатация транспортных систем и логистика» Донского государственного технического университета (344000, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, [ScopusID](#), [ORCID](#), korot@novoch.ru

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Панфилов — формирование основной концепции, цели и задачи исследования; Н. Н. Николаев — подготовка данных, подготовка текста, формирование выводов; А. Р. Юсупов — подготовка данных, подготовка текста, подготовка иллюстраций; А. А. Короткий — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ



Научная статья

УДК 614. 841

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-70-75>

Структурная организация стали для обеспечения безопасности специальной техники

В. Н. Пустовойт , Ю. В. Долгачев , И. В. Иванков 

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

✉ fipm-dstu@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время в качестве бронезащитных элементов выступают различные неметаллические, металлокерамические и композитные материалы. Однако большинство бронезащитных элементов транспорта и средств индивидуальной защиты (СИБ) изготавливаются из стали, обладающей хорошей баллистической стойкостью, но высокой массой. В связи с этим актуальной является задача облегчения типовых защитных элементов. Это возможно при использовании материала, имеющего структурную организацию. Таковым является естественный ферритно-мартенситный композит (ЕФМК). Целью данной работы является оценка перспективности применения стали с ориентированной структурой в качестве эффективного защитного материала при воздействии высокоскоростным сосредоточенным ударом большой мощности.

Материалы и методы. Выявлены особенности и недостатки эффективных броневых сталей, проведен сравнительный анализ со сталью, ориентированной как ЕФМК. Проведена оценка состояния микроструктуры стали 14Г2 с разной температурой закалки (730 °С и 760 °С) методом микроструктурного анализа. Показаны перспективы применения низкоуглеродистой ферритно-мартенситной стали на основании закономерностей механики разрушения и сопоставления с экспериментально полученными данными на образце стали 14Г2 размерами 150×44×7 мм после испытания на пулестойкость патронами со стальным сердечником и бронебойными с вольфрамовым сердечником из винтовки СВД и автомата АК–74 калибра 7,62 мм и 5,45 мм соответственно.

Результаты исследования. Оценены возможности сопротивления разрушению стали с ориентированной ферритно-мартенситной структурой в сравнении с типовыми гомогенными и гетерогенными стальными материалами. Стойкость такой стали связана с характером развития разрушения, выраженном в торможении трещины при расслоении на границах феррит-мартенсит. При образовании расслоения трещина затрачивает энергию на расслоение и меняет свое направление, что в последующем приводит к полной остановке процесса разрушения.

Обсуждение и заключение. Недостатки броневых элементов из гомогенных и гетерогенных стальных материалов, связанных с высокой эффективной толщиной защитного элемента и трудоемким процессом получения стального пакета соответственно, могут быть решены применением ориентированной ферритно-мартенситной стали. Приведенные данные указывают на более высокую сопротивляемость разрушению ввиду особого механизма распространения трещины, что является актуальным в развитии бронетехники. Это позволяет снизить общую массу боевого транспорта, связанного со снижением эффективной толщины защитных элементов при сохранении требуемого класса стойкости высокоскоростному ударному нагружению, что позволит повысить их мобильность и снизить расход топлива.

Ключевые слова: стальной композит, феррит, мартенсит, высокоскоростной удар, сопротивление разрушению, термическая обработка, обеспечение безопасности специальной техники.

Для цитирования. Пустовойт, В. Н. Структурная организация стали для обеспечения безопасности специальной техники / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачев, И. В. Иванков // Безопасность техногенных и природных систем. — 2023. — № 1. — С. 70–75. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-70-75>

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

Structural Organization of Steel to Ensure Special Equipment Safety

Viktor N. Pustovoi^{ID}, Yuri V. Dolgachev^{ID}, Ivan V. Ivankov^{ID}

Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation

✉ fipm-dstu@mail.ru

Abstract

Introduction. At present, great success has been achieved in the field of creating effective protective materials. Various non-metallic, metal-ceramic, and also composite materials act as armor elements. However, most of the armor elements of vehicles and personal protective equipment (PPE) are steels that, along with high ballistic resistance, have a high mass. In this regard, the relevance of the article is related to the possibility of lightening typical protective elements when using a material that has a structural organization like a natural ferrite-martensite composite (NPMC). The work objective is to evaluate the prospects of using steel with an oriented structure as an effective protective material when exposed to high-speed concentrated impact of high power in comparison with the steel materials used.

Materials and Methods. The features and disadvantages of effective armor steels are revealed, a comparative analysis is carried out with steel oriented as NPMC. The assessment of 14G2 steel microstructure state with different hardening temperatures (730°C and 760°C) was carried out by the method of microstructural analysis. In relation to the topic of the study, the prospects for the use of low-carbon ferritic-martensitic steel were shown based on the laws of fracture mechanics and their comparison with the experimental data obtained on a sample of 14G2 steel with dimensions of 150×44×7 mm after testing for bullet resistance by cartridges with a steel core and armor-piercing cartridges with a tungsten core made of SVD rifles and AK-74 assault rifles of 7.62 mm and 5.45 mm caliber, respectively.

Results. The possibilities of resistance to fracture of steel with an oriented ferritic-martensitic structure are evaluated in comparison with typical homogeneous and heterogeneous steel materials. The resistance of such steel is related to the nature of the development of fracture, expressed in the deceleration of the crack during delamination at the ferrite-martensite boundaries. When a delamination is formed, a crack expends energy on delamination and changes its direction, which subsequently leads to a complete stop of the fracture process.

Discussion and Conclusion. The disadvantages of armor elements made of homogeneous and heterogeneous steel materials, associated with a high effective thickness of the protective element and the laborious process of obtaining a steel sandwich, respectively, can be solved by using oriented ferritic-martensitic steel. The data presented indicate a higher fracture resistance due to a special crack propagation mechanism, which is relevant in the development of armored vehicles. This makes it possible to reduce the total mass of combat vehicles associated with a decrease in the effective thickness of protective elements while maintaining the required class of resistance to high-speed impact loading, which will increase their mobility and reduce fuel consumption.

Key words: steel composite, ferrite, martensite, high-speed impact, fracture resistance, heat treatment, ensuring the safety of special equipment.

For citation. V. N. Pustovoi, Yu. V. Dolgachev, I. V. Ivankov. Structural Organization of Steel to Ensure Special Equipment Safety. Safety of Technogenic and Natural Systems, 2023, no.1, pp. 70–75. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-1-70-75>

Введение. Характерной тенденцией развития военной техники является перманентное совершенствование защитных материалов. Так, вместо толстого листового проката, переходят к созданию многослойных металлических, а также неметаллических и металлокерамических композиций. При этом процесс создания эффективных защитных материалов преследует две цели — снижение массы защитного элемента и повышение его баллистической стойкости. Именно эти взаимоисключающие факторы позволяют повысить мобильность боевых транспортных систем и обеспечить безопасность от воздействия различных огнестрельных и осколочных видов поражений. Для одновременного достижения вышеуказанных целей предлагается использовать в качестве эффективного защитного материала сталь со структурой, организованной как естественный феррито-мартенситный композит (ЕФМК).

Материалы и методы. Развитие указанных выше материалов начиналось со стремления повысить сопротивление высокоскоростному удару большой мощности горячекатаных гомогенных стальных листов с различным содержанием углерода и разной степенью легированности. Так, в работе по получению

пулестойкого стального материала¹, отражены преимущества легированной углеродистой стали состава, %: углерод — 0,44–0,48; кремний — 1,2–1,6; марганец — 0,3–0,6; хром — 1,3–1,7; никель — 1,4–1,8; молибден — 0,2–0,4; железо — остальное. Эта сталь после закалки и низкого отпуска имеет твердость порядка 55–57 HRC и при толщине пластины от 4,0 мм обеспечивает 3-ий класс защиты от стальной пули ПС калибра 7,62 мм (патрон 57-Н-231) автомата АКМ и пули ПС (патрон 7Н6) калибра 5,45 мм автомата АК-74. Такой материал обладает малой эффективной толщиной (на 8–9 % меньше, по сравнению с типовыми сталями), однако его разрушение происходит по механизму хрупкого разрушения (обычно происходит раскол бронепластины). Кроме того, производство такой стали требует тщательного контроля химического состава. Повышение вязкости и смены характера разрушения требует снижения твердости материала, однако, если твердость ниже 48 HRC, при испытании пулями с термоупрочненным сердечником происходит пробитие материала, хотя разрушение является вязким.

Для устранения этого недостатка были созданы двух- и более слойные стальные композиции. Они изготавливаются методами сварки взрывом, пакетной прокатки или наплавки [1, 2]. Основные принципы разработки двухслойных материалов сводятся к получению высокой твердости лицевого слоя (порядка 58–60 HRC) и высокой вязкости тыльного слоя с сохранением твердости не менее 50 HRC. Испытания двухслойных стальных композиций показали, что при стрельбе из винтовки СВД (калибр 7,62 мм, патрон 7-БЗ-3, бронебойная зажигательная пуля БЗ2) имеет место непробитие листов при толщинах 10,2–10,6 мм. Но при более высокой стойкости данных материалов эффективная толщина, по сравнению с однородными стальными бронепластинами, практически в 2–2,5 раза больше.

Применение трехслойных композиций с прослойкой из низкоуглеродистой стали [3] дает возможность снизить толщину бронелиста до 8,9 мм. Однако существенным недостатком является сложный технологический процесс получения многослойных броневых листов. Для надежного сцепления применяется трудоемкая сварка взрывом, горячая прокатка с обжатием до 70 %, а в некоторых случаях — комбинированный способ с последующей термообработкой.

В настоящей работе показаны преимущества защитного материала в виде стали со структурой, организованной как ЕФМК.

Результаты исследования. Известная технология получения ЕФМК² заключается в контролируемой прокатке в межкритическом интервале температур (A_1 – A_3) сталей с концентрацией углерода 0,1–0,2 % для ориентирования в направлении прокатки ферритной и аустенитной фазы при степени обжатия не менее 30 % и последующей закалке. Однако прокатка в данном интервале температур является достаточно трудоемкой, так как требует наличия мощного прокатного оборудования. Кроме того, при низкой степени обжатия не удастся получить строгой ориентации феррито-мартенситной структуры.

В то же время получение феррито-мартенситного композита возможно менее трудоемким способом. Строгая ориентировка структуры может быть получена применением следующего технологического режима³: горячая прокатка с обжатием не менее 70 % с последующим подстуживанием до межкритического интервала температур (A_{C1} – A_{C3}), выдержке в этом интервале для рафинирования фазы, закалка с последующим низким отпуском. Такая обработка не требует мощного прокатного оборудования и может осуществляться в обычном прокатном цехе. При этом необходимо контролировать содержание серы на верхнем уровне марочного состава (0,04–0,05 %) для образования достаточного количества сульфидов (Fe, Mn)S, которые при прокатке вытягиваются в тонкие пластины (рис. 1 а) и являются подложками, на которых образуется избыточный феррит (рис. 1 б), образуя вытянутые вдоль направления прокатки пластинчатые образования. Также ориентировано располагается и перлитная структурная составляющая (рис. 1 в).

¹ Камаев Е. А., Сахаров С. А. Высокопрочная броневая листовая сталь: патент 2185459 С1 Рос. Федерация: С22С 38/44 / № 2001124667/02 ; заявл. 03.09.01 ; опубл. 20.07.02 "

² Термическая и термомеханическая обработка стали и чугуна / А. В. Супов [и др.] // Металловедение и термическая обработка стали и чугуна. Справочник. М : Интермет Инжиниринг, 2007. Т. 3. 919 с

³ Способ получения естественного ферритно-мартенситного композита: патент № 2495141 Рос. Федерация : С21D 8/00, С21D 8/02 / В. Н. Пустовойт [и др.]. № 2012119557/02 ; заявл. 11.05.12 ; опубл. 10.10.13. Бюл. № 28. 7 с

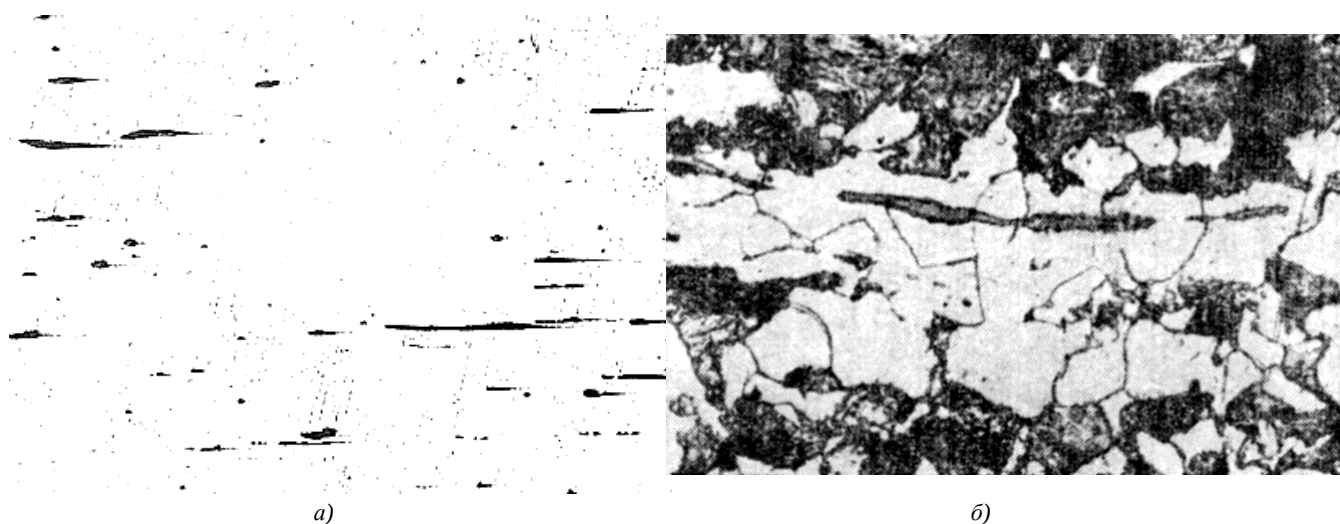


Рис. 1. Сталь 14Г2 со структурой ферритно-мартенситного композита: *а* — вытянутые вдоль направления прокатки сульфиды, $\times 100$; *б* — зарождение феррита на сульфидной подложке, $\times 300$

Варьируя температурой закалки из межкритического интервала, можно получить различные соотношения объемных долей феррита и мартенсита⁴, а также разную концентрацию углерода в мартенсите и, следовательно, разную твердость мартенситных пластин. В результате такого процесса получается ориентированная феррито-мартенситная структура, обеспечивающая анизотропию свойств материала (рис. 2).



Рис. 2. Сталь 14Г2 со структурой ЕФМК после закалки от 780 °С (29 % мартенсита), $\times 360$

Теоретические расчеты [4] показывают, что слоистость (искусственная или естественная) повышает вязкость разрушения материала и уменьшает скорость распространения трещины.

Для структуры ЕФМК необходимо отметить, что мартенситные слои в ферритной матрице имеют конечную длину (дискретные волокна) и некоторую разориентировку слоев феррита и мартенсита. В таком случае, как отмечено в работе [5], высокое сопротивление разрушению обеспечивается при объемной доле упрочняющей фазы $\sim 20\text{--}25\%$, определенной длине волокон из упрочняющей фазы (мартенсит) больше некоторой критической величины ($l_{кр} \geq 80$ мкм), а также разориентировке ферритных и мартенситных слоев не более 15.

Результаты испытаний [6] стальных пластин со структурой ЕФМК (размеры $150 \times 44 \times 7$ мм) патронами со стальным сердечником и бронебойными с вольфрамовым сердечником из винтовки СВД и автомата АК–74 калибра 7,62 мм и 5,45 мм показали, что образец с малой толщиной ферритной прослойки и мартенситом с низким содержанием углерода (закалка от 760 °С) практически всегда разрушался. В то же время образец с большей толщиной ферритной прослойки и более высокоуглеродистым мартенситом (закалка от 730 °С) показал высокую баллистическую стойкость (рис. 2). Данный образец не разрушался после отстрела

⁴ Лавриненко В. Ю., Посалина А. Е. Исследование влияния предварительной термической обработки на получение двухфазной ферритно-мартенситной структуры сталей 20 и 20Г2Р // Новые технологии в учебном процессе и производстве : мат-лы XX междунар. науч.-тех. конф. Рязань, 2022. С. 111–115.

бронебойными пулями, происходило деформирование металла на 2–3 мм с рикошетированием снаряда, при этом на тыльной стороне образовывалась небольшая трещина.

Высокая баллистическая стойкость стали с такой структурой связана с особым механизмом развития разрушения в материале. Когда в процессе движения трещины она подходит к границе феррит-мартенсит, возникает расслоение в феррите (рис. 3), вследствие чего трещина меняет направление движения и затрачивает энергию на расслоение феррита. Последующее развитие разрушения приводит к изменению траектории трещины с расслоением по ферриту, остановкой движения трещины и релаксации напряжений в ее вершине.

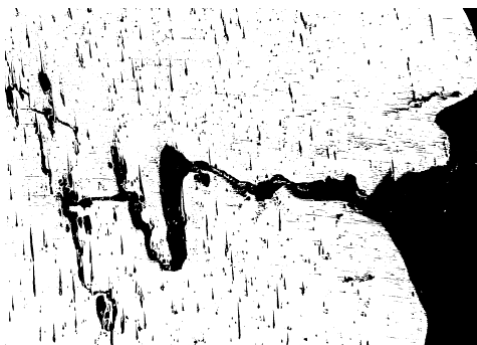


Рис. 3. Направление движения трещины в материале со структурой ЕФМК, имеющей вертикальную ориентацию слоев, $\times 50$

Этот результат согласуется с данными работ [4, 7, 8], в которых указано, что в слоистом материале по поверхности раздела в процессе разрушения могут образовываться несплошности, переводящие трещину в менее выгодное для ее распространения положение и приводящие к торможению разрушения.

Обсуждение и заключения. Таким образом, результаты испытаний показывают, что применение стали со структурой ЕФМК обеспечивает высокий уровень баллистической стойкости при меньшей эффективной толщине и трудоемкости изготовления данного материала. Это указывает на ее преимущества по сравнению с однородными сталями и многослойными стальными композициями. Особый способ торможения разрушения при высокоскоростном локальном воздействии большой мощности обеспечивает более высокий порог живучести защиты, а снижение эффективной толщины способствует повышению мобильности боевого транспорта и личного состава за счет снижения общей массы защиты.

Список литературы

1. Перспективные стали для защиты специальной техники / В. В. Цуканов, А. Б. Милейковский, О. Э. Нигматулин, С. А. Савичев // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. — 2018. — № 1–2 (115–116). — С. 86–94.
2. Гладышев, С. А. Броневые стали / С. А. Гладышев, В. А. Григорян. — Москва : Интермет Инжиниринг, 2010. — 334 с.
3. Шишкин, Т. А. Комбинированный метод изготовления бронестали / Т. А. Шишкин, Л. Б. Первухин // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2020. — № 11(246). — С. 53–57.
4. Krausz, A. S. Fracture Kinetics of Crack Growth / A. S. Krausz. — Springer Netherlands, 2011. — 196 p.
5. Wood, W. A. The Study of Metal Structures and Their Mechanical Properties / W. A. Wood. — Elsevier Science, 2014. — 400 p.
6. Пустовойт, В. Н. Баллистическая стойкость стали со структурой естественного феррито-мартенситного композита / В. Н. Пустовойт, Ю. В. Долгачев, Ю. М. Домбровский // Безопасность техногенных и природных систем. — 2022. — № 3. — С. 54–59. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-3-54-59>
7. Пустовойт, В. Н. Сценарий роста трещины в стали со структурой ферритно-мартенситного композита / В. Н. Пустовойт, В. В. Дука, Ю. В. Долгачев // Известия Волгоградского государственного технического университета. — 2017. — № 10 (205). — С. 118–121.
8. Structural Organization and Properties of a Natural Ferrite-Martensite Steel Composite / V. N. Pustovoi, Y. U. Dolgachev, Y. M. Dombrovskii, V. V. Duka // Metal Science and Heat Treatment. — 2020. — No. 62 (5-6). — P. 369–375. [10.1007/s11041-020-00570-9](https://doi.org/10.1007/s11041-020-00570-9)

Поступила в редакцию 09.01.2023

Поступила после рецензирования 16.01.2023

Принята к публикации 16.01.2023

Об авторах:

Пустовойт Виктор Николаевич, профессор кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, [ORCID](#), fipm-dstu@mail.ru

Долгачев Юрий Вячеславович, доцент кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, [ORCID](#), yridol@mail.ru

Иванков Иван Вениаминович, магистрант кафедры «Материаловедение и технологии металлов» Донского государственного технического университета, (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), магистрант, [ORCID](#), yanya.ivankov.99@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

В. Н. Пустовойт — формирование основной концепции, цели и задач исследования, научное руководство, подготовка текста, формирование выводов; Ю. В. Долгачев — проведение испытаний, обработка, анализ и обсуждение результатов исследования; И. В. Иванков — подготовка образцов для проведения металлографического анализа, доработка текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.