

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Научная статья

УДК 656.13(1-21); DOI: 10.61260/2307-7476-2023-4-15-22

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОННО-УПРАВЛЯЕМЫХ ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ДИАГНОСТИРОВАНИЕ

✉ Гавкалюк Богдан Васильевич;

Ложкин Владимир Николаевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ rector@igps.ru

Аннотация. Статья посвящена теории и практике диагностирования пожарно-аварийных режимов эксплуатации поршневых двигателей с нейтрализаторами в составе транспортных средств с электронно-цифровым управлением процессами топливоподачи. Концепция работы – полидисциплинарная, актуализируется на анализе проблем глобальной экологической устойчивости, фундаментальных и прикладных исследований по кинетике и энергетической динамике генерации полезного и пожароопасного избыточного тепла в двигателях и нейтрализаторах при горении углеводородов топлива. В работе предлагается метод диагностики, основанный на инструментальном газоаналитическом контроле состава отработавших газов поршневого двигателя на режиме свободного ускорения и использовании уравнений множественной регрессии связи состава отработавших газов с параметрами топливоподачи.

Ключевые слова: каталитический нейтрализатор, электронная система управления топливоподачей, пожарно-аварийный режим, диагностирование

Для цитирования: Гавкалюк Б.В., Ложкин В.Н. Обеспечение пожарной безопасности сложных электронно-управляемых термokatалитических систем двигателей внутреннего сгорания: теоретические основы, диагностирование // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2023. № 4 (48). С. 15–22. DOI: 10.61260/2307-7476-2023-4-15-22.

Scientific article

ENSURING FIRE SAFETY OF COMPLEX ELECTRONICALLY CONTROLLED THERMOCATALYTIC SYSTEMS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES: THEORETICAL FOUNDATIONS, DIAGNOSTICS

✉ Gavkalyuk Bogdan V.;

Lozhkin Vladimir N.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ rector@igps.ru

Abstract. The article is devoted to the theory and practice of diagnosing fire and emergency modes of operation of piston engines with neutralizers as part of vehicles with electronic and digital control of fuel supply processes. The concept of the work is multidisciplinary, updated on the analysis of problems of global environmental sustainability, fundamental and applied research on the kinetics and energy dynamics of the generation of useful and flammable excess heat in engines and neutralizers during the combustion

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023

of fuel hydrocarbons. Gorenje The paper proposes a diagnostic method based on instrumental gas analytical control of the exhaust gas composition of a piston engine in the free acceleration mode and the use of multiple regression equations for the relationship of the exhaust gas composition with fuel supply parameters.

Keywords: catalytic converter, electronic fuel supply control system, fire-emergency mode, diagnostics

For citation: Gavkalyuk B.V., Lozhkin V.N. Ensuring fire safety of complex electronically controlled thermocatalytic systems of internal combustion engines: theoretical foundations, diagnostics // *Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty) = Natural and man-made risks (physico-mathematical and applied aspects)*. 2023. № 4 (48). P. 15–22. DOI: 10.61260/2307-7476-2023-4-15-22.

Введение. Анализ состояния проблемы

Устойчивость и процветание цивилизаций невозможно было представить без мирового разделения труда и коммуникативности обмена сырьевыми, промышленными и продовольственными ресурсами [1]. Подтверждением этому является бурное развитие всех видов транспорта в новейшей истории 2000–2020 гг. [2, 3], безусловным лидером которого по объему грузопассажирских перевозок в глобальной системе национальных и интермодальных коммуникаций остаются автомобильные транспортные средства [1–3].

Автомобилизация в крупных городах мира [1, 3] породила проблему сверхнормативного загрязнения воздушной среды поллютантами и парниковыми газами отработавших газов (ОГ) двигателей [2], которая стала решаться применением каталитических нейтрализаторов (КН), управляемых электронно-цифровыми системами впрыска топлива [4]. Из-за сложности топливно-каталитических систем (ТКС) в эксплуатации они стали давать сбои, приводящие к неуправляемому «разгону» экзотермических реакций в реакторах КН, сопровождающихся их перегревом, и нередко к возгоранию транспортного средства (ТС) [5, 6]. При серьезных неисправностях ТКС температура КН может достигать значений более 1 000 °С [6] (рис. 1).



Рис. 1. Под полностью выгоревшей антикоррозионной обшивкой днища кузова ТС Skoda Yeti 1.2 TSI [6] со стороны КН (показано стрелками) – отожжены левый лонжерон и две тормозные магистрали (трубки)

Причины перехода в пожарно-аварийные режимы эксплуатации ТКС на ТС детально рассмотрены в авторской работе [4]. Эмерджентная (общесистемная) причина состоит в нерешенности технического противоречия в необходимости достижения одновременно экологической эффективности и пожаробезопасности ТКС на компромиссной основе. Например, удовлетворение экологическим свойствам ТС потребовало установки в ТКС двух КН (первого (по ходу движения ОГ из цилиндров двигателя) – сразу за выпускным коллектором в моторном отсеке; второго – под днищем кузова ТС (рис. 1). В совместных

изысканиях института передовой науки и технологий (Advanced Institute of Science and Technology, Корея) и компании Хёндай-мотор (Hyundai-Motor Company, Корея) [7] была экспериментально исследована имитационным методом при помощи программно-управляемого генератора отключения зажигания, по сути, одна из наиболее характерных в эксплуатации причин возгорания ТС от аварийного КН при сбоях в системе воспламенения топливовоздушной смеси в цилиндрах двигателя бензинового/газобаллонного ТС (рис. 2).

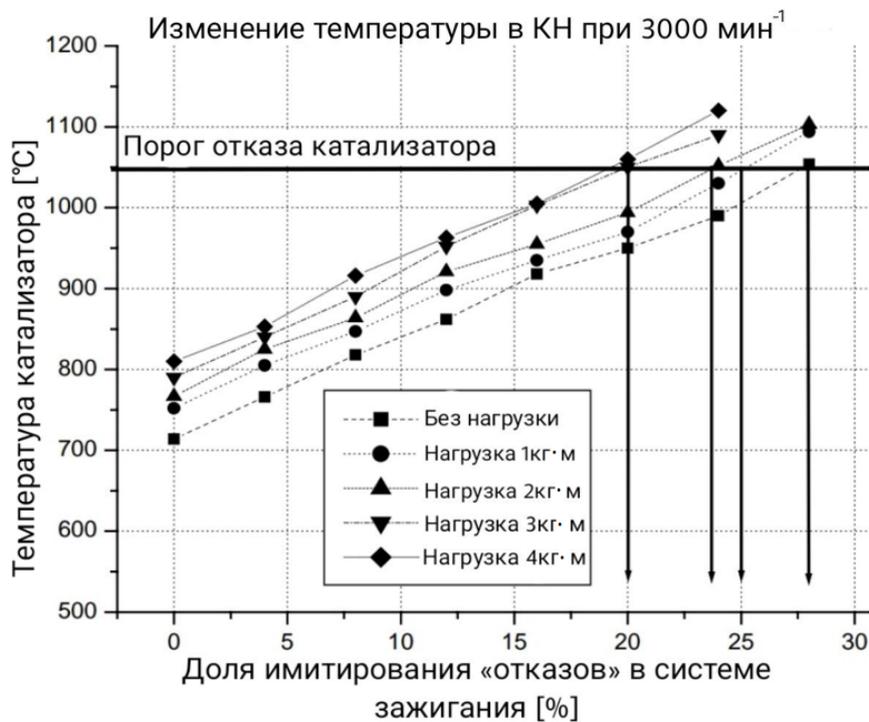


Рис. 2. Влияние частоты пропусков зажигания на температуру, развиваемую в КН, расположенном в моторном отсеке бензинового автомобильного 4-х цилиндрового двигателя модели SI в зависимости от нагрузки при частоте вращения коленчатого вала $n = 3\,000\text{ мин}^{-1}$

Анализ данных экспериментов на рис. 2 показывает, что при различных нагрузках двигателя зависимость между температурой в каталитическом реакторе КН и частотой пропусков зажигания сохраняется линейной (что имеет важное значение с точки зрения математического моделирования в целях прогнозирования аварийно-пожароопасного развития неуправляемого процесса тепловыделения в реакторе КН). При частоте вращения коленчатого вала $3\,000\text{ мин}^{-1}$ и нагрузке $4\text{ кг}\cdot\text{м}$ с увеличением частоты пропусков зажигания до 20% температура катализатора увеличилась примерно на 250 °C и подошла к температурному «порогу», за которым с высокой вероятностью, следует ожидать наступление дезактивации катализатора, его плавление и разрушение («отказ») с высокими рисками пожарной опасности.

Проблема возгорания по причине перехода ТКС в пожароопасные режимы неуправляемого протекания мощных каталитических восстановительных и окислительных реакций, включая регенерацию керамических фильтров от сажи, характерны сегодня в большей мере и для электронно-управляемых ТКС дизельных ТС. Завершая анализ проблемы, следует заметить, что в связи с наблюдаемым на рынке Российской Федерации за последнее десятилетие ростом запроса продаж ТС с ТКС, обладающих целым рядом потребительских достоинств, действие нормативного документа может не лучшим образом сказаться на пожарном риске автотранспорта [8].

Методика

В работе предлагается метод диагностики аварийных, в частности по направлениям эколого-пожарной ответственности, режимов эксплуатации поршневых двигателей воспламенения от сжатия, разработанный соавтором настоящего исследования [9]. Он основан на инструментальном газоаналитическом контроле состава отработавших газов поршневого двигателя на режиме свободного ускорения (СУ) по действующему нормативному документу ГОСТ 33997–2016 [10] и использовании уравнений множественной регрессии связи состава отработавших газов с регулировочными параметрами топливоподачи (с аварийно-опасными отклонениями относительно значений, рекомендуемых к установке согласно документации предприятия-изготовителя двигателя).

Рабочей научно-методической гипотезой реализации процедуры СУ, подтверждение которой было одной из главных целей работы, являлось допущение (утверждение) постулата, выявленного в ходе предварительных теоретических изысканий [4, 9, 11] – применение режима СУ по предложенной методике его исполнения [11] в условиях реальной эксплуатации даст возможность параллельно решить две важнейшие задачи, а именно: расширить номенклатуру контроля опасных химических веществ ОГ ($PM_{2.5}$, CO, NO_x , CH, CO_2) и диагностировать аварийно-опасные отклонения регулировок топливной аппаратуры от штатных их значений. Методически доказательство научной гипотезы осуществлялось путем применения теории математического планирования и обработки данных факторного эксперимента на дизельном двигателе 4Ч 11/12.5.

Следует особо подчеркнуть, что предложенный метод, благодаря тому, что он разработан на основе глубинных знаний и пониманий, полученных авторами о кинетике внутрицилиндровых процессов комбинированного поршневого двигателя внутреннего сгорания (ДВС-КН) [4, 9], является универсальным как для диагностирования отказов аварийно-опасных отклонений регулировок топливоподачи для ДВС с КН, так и для ДВС без КН (применение которых, как это было отмечено выше, допускается нормативным документом [8]).

Результаты исследования

Теоретическое обоснование метода диагностирования аварийно-опасных режимов эксплуатации дизелей тракторного и комбайнового назначения по данным контроля дымности и состава ОГ в режиме СУ основано на анализе уравнений множественной регрессии, выявленных экспериментальным путем, аппроксимирующих эмпирические зависимости с необходимой точностью. Реализация разработанного диагностического подхода применительно к идентификации опасных отклонений регулировок топливоподачи решается в два этапа.

1 этап.

Путем проведения эксперимента на дизеле 4РЧ 11/12.5 в режиме СУ устанавливается характер связи дымности и состава ОГ с отклонениями значений основных регулировочных параметров ТА $g_{\text{цн}}$, $P_{\text{ф}}$, $\mu_{\text{ср}}$, Θ при их варьировании в пределах эксплуатационных отклонений по однофакторному плану (на рис. 3 для примера показан фрагмент выявленных закономерностей в графической форме для угла опережения впрыскивания топлива в цилиндры Θ).

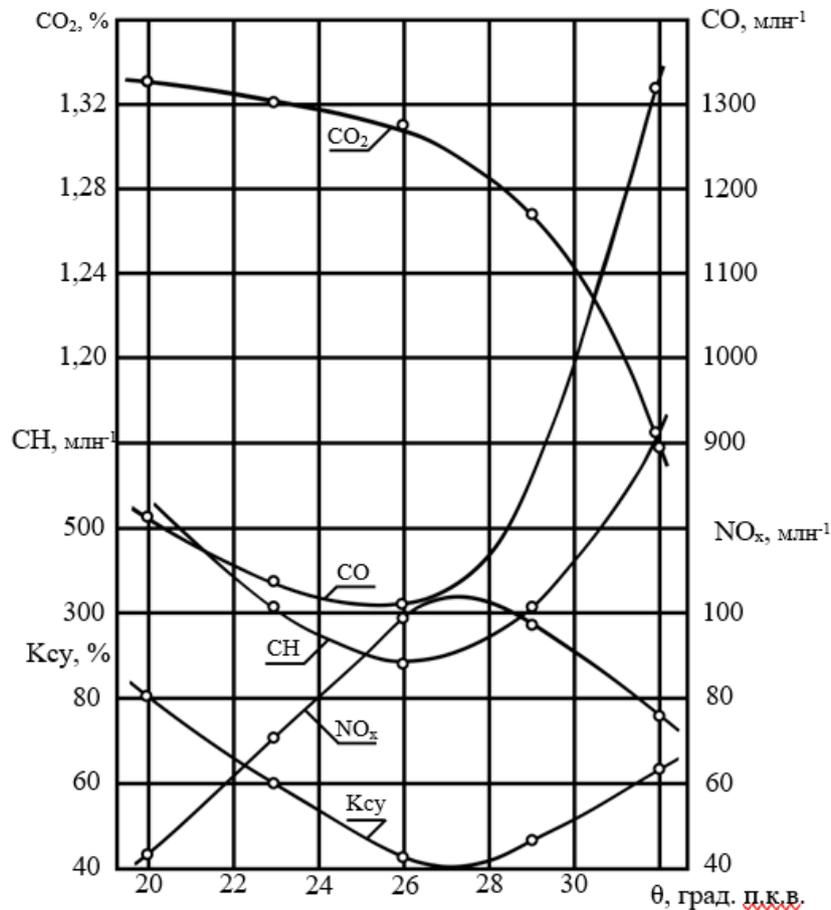


Рис. 3. Связь дымности и состава ОГ с отклонениями значений θ дизеля 4РЧ 11/12.5 на режиме СУ

2 этап.

Выявленный характер эмпирических закономерностей для удобства пользования ими в диагностических целях автоматизированным аналитическим путем с помощью цифровых вычислительных машин преобразуется в форму уравнений множественной регрессии связи основных регулировочных параметров ТА $g_{цн}$, P_{ϕ} , $\mu f_{ср}$, θ с дымностью и составом ОГ (K , CO , NO_x , CH , CO_2) для режима СУ. Ниже в качестве примера приводятся расчетные уравнения (2) ... (5) для дизеля 4РЧ 11/12.5 при аппроксимации в форме степенной модели (1).

Степенная модель вида:

$$y = ax_1^{b1} \cdot x_2^{b2} \cdot x_3^{b3} \cdot x_4^{b4} \cdot x_5^{b5} \quad (1)$$

и соответствующие ей уравнения множественной регрессии:

$$g_{цн} = 174,484 \cdot K^{0,133} \cdot CH^{-1,132} \cdot NO_x^{0,243} \cdot CO_2^{34,869} \cdot CO^{-0,878}; \quad (2)$$

$$P_{\phi} = 2,470 \cdot K^{-0,962} \cdot CH^{0,565} \cdot NO_x^{0,374} \cdot CO_2^{3,735} \cdot CO^{-0,019}; \quad (3)$$

$$\mu f_{ср} = 0,198 \cdot K^{0,248} \cdot CH^{0,009} \cdot NO_x^{-0,130} \cdot CO_2^{0,186} \cdot CO^{-0,044}; \quad (4)$$

$$\theta = 460,849 \cdot K^{0,387} \cdot CH^{0,164} \cdot NO_x^{0,621} \cdot CO_2^{-4,910} \cdot CO^{-1,018}, \quad (5)$$

где $g_{\text{ци}}$ – установочное значение цикловой подачи топлива на номинальном режиме работы дизеля, $\text{мм}^3/\text{цикл}$; $P_{\text{ф}}$ – установочное значение начального давления впрыскивания топлива, МПа; $\mu f_{\text{ср}}$ – пропускная способность распылителей форсунок, мм^2 ; θ – установочный угол опережения впрыскивания топлива; K, CO, NO_x , CH, CO_2 – интегральные значения, соответственно, дымности ОГ на режиме СУ, %; концентрации оксида углерода, млн^{-1} ; суммарных оксидов азота в пересчете на NO_2 , млн^{-1} ; суммарных углеводородов, млн^{-1} ; диоксида углерода, об.%, измеренных после сбора ОГ при работе дизеля в режиме СУ в эластичную емкость (пробоотборный «мешок»). Средняя погрешность аппроксимации (в %) $g_{\text{ци}} - 0,157$; $P_{\text{ф}} - 0,112$; $\mu f_{\text{ср}} - 0,068$; $\theta - 0,799$.

Как можно заключить из анализа точности оценок:

– применение в диагностических расчетах предложенной математической модели с высокой степенью надежности (сходимости данных расчета с данными экспериментальных исследований) позволяет идентифицировать по комплексу измеренных значений K, CH, NO_x , CO_2 , CO в режиме СУ значения основных регулировочных параметров топливной аппаратуры. Несложно рассчитываемые искомые отклонения расчетных значений диагностических параметров ТА от их предельных значений (установленных согласно требованиям технической документации предприятия-изготовителя двигателя) в дальнейшем позволяют, по соответствующим методикам [9, 11] произвести оценку степени опасности технических «отказов», произошедших, например, в цилиндропоршневой группе деталей, системах газораспределения, воздушного-снабжения, ТКС, отклонений качества топлива и т.д. в эксплуатации;

– относительно более высокая точность оценок значений диагностируемых регулировочных параметров ТА дизелей КТС и, следовательно, производных от них значений степени опасности аварийных режимов ее эксплуатации, очевидно, связана с тем, что в предложенном методе задействовано пять характеристик состава отработавших газов, каждая из которых имеет «специфично свою» физико-химическую природу образования в первоисточнике – камерах сгорания поршневого двигателя ТС.

Признательности

Авторы выражают признательность кандидату технических наук, доценту А.И. Фомичеву за предоставленные материалы, анализ которых позволил уточнить методику прогнозирования аварийно-опасных режимов эксплуатации поршневых двигателей с воспламенением от сжатия.

Список источников

1. Al-Delaimy W., Ramanathan V., Sorondo M. Health of people, health of planet and our responsibility: climate change, air pollution and health. Springer, 2020. 417 p. DOI: 10.1007/978-3-030-31125-4.
2. Методические основы организации экологических зон с низкими выбросами автомобильного транспорта: монография / В.В. Донченко [и др.]. СПб.: Издат.-полиграф. компания «Коста», 2023. 264 с.
3. Валдин В.В. Рекомендации по обеспечению надежности общественного транспорта / под ред. В.В. Валдина, А.Э. Горева; пер. с нем. А.С. Болотиной. СПб.: Изд.-полиграф. компания «Коста», 2023. 144 с.
4. Ложкин В.Н., Ложкина О.В. Информационные процессы в управлении комплексной безопасностью транспорта: стратегическое планирование и моделирование: монография / под общ. ред. Б.В. Гавкалюка. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2022. 164 с. ISBN 978 -5-907489-15-8.
5. Robert Bacon. What Causes the Catalytic Converter to Go Bad? May 25, 2021–2023. URL: <https://www.automotiveguider.com/automotive-guides/what-causes-the-catalytic-converter-to-go-bad/> (дата обращения: 18.08.2023).

6. Комплексная автотехническая и пожарно-техническая экспертиза по определению причины возгорания автомобиля Skoda Yeti. URL: <http://avtotehexpert.ru/nashi-avtoekspertizy/vozgoranie-avtomobilya-ot-katalizatora-99/> (дата обращения: 18.08.2023).

7. Effects of Engine Operating Conditions on Catalytic Converter Temperature in an SI Engine / S. Lee [et al.]. Society of Automotive Engineers, 2002. DOI: 10.4271/2002-01-1677.

8. О внесении изменений в Правила применения обязательных требований в отношении отдельных колесных транспортных средств и проведения оценки их соответствия: постановление Правительства Рос. Федерации от 15 июня 2022 г. № 1269. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

9. Ложкин В.Н. Теория и практика диагностики пожароопасных режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31. № 3. С. 65–74. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74.

10. ГОСТ 33997–2016. Колёсные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146241> (дата обращения: 18.08.2023).

11. Ложкин В.Н. Электромеханический манипулятор для выявления аварийно-опасных режимов эксплуатации дизельных машин в условиях Арктики // Экстремальная робототехника. 2021. Т. 1. № 1. С. 123–130. DOI: 10.31776/ConfER.

References

1. Al-Delaimy W., Ramanathan V., Sorondo M. Health of people, health of planet and our responsibility: climate change, air pollution and health. Springer, 2020. 417 p. DOI: 10.1007/978-3-030-31125-4.

2. Metodicheskie osnovy organizacii ekologicheskikh zon s nizkimi vybrosami avtomobil'nogo transporta: monografiya / V.V. Donchenko [i dr.]. SPb.: Izdat.-poligraf. kompaniya «Kosta», 2023. 264 s.

3. Valdin V.V. Rekomendacii po obespecheniyu nadezhnosti obshchestvennogo transporta / pod red. V.V. Valdina, A.E. Goreva; per. s nem. A.S. Bolotinoj. SPb.: Izd.-poligraf. kompaniya «Kosta», 2023. 144 s.

4. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V. Informacionnye processy v upravlenii kompleksnoj bezopasnost'yu transporta: strategicheskoe planirovanie i modelirovanie: monografiya / pod obshch. red. B.V. Gavkalyuka. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. 164 s. ISBN 978 -5-907489-15-8.

5. Robert Bacon. What Causes the Catalytic Converter to Go Bad? May 25, 2021–2023. URL: <https://www.automotiveguider.com/automotive-guides/what-causes-the-catalytic-converter-to-go-bad/> (дата обращения: 18.08.2023).

6. Kompleksnaya avtotekhnicheskaya i pozharo-tekhnicheskaya ekspertiza po opredeleniyu prichiny vozgoraniya avtomobilya Skoda Yeti. URL: <http://avtotehexpert.ru/nashi-avtoekspertizy/vozgoranie-avtomobilya-ot-katalizatora-99/> (дата обращения: 18.08.2023).

7. Effects of Engine Operating Conditions on Catalytic Converter Temperature in an SI Engine / S. Lee [et al.]. Society of Automotive Engineers, 2002. DOI: 10.4271/2002-01-1677.

8. О внесении изменений в Правила применения обязательных требований в отношении отдельных колесных транспортных средств и проведения оценки их соответствия: постановление Правительства Рос. Федерации от 15 июня 2022 г. № 1269. Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

9. Lozhkin V.N. Teoriya i praktika diagnostiki pozharoопасnyh rezhimov ekspluatatsii kataliticheskikh nejtralizatorov // Pozharovzryvobezopasnost'. 2022. Т. 31. № 3. С. 65–74. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74.

10. GOST 33997–2016. Kolyosnye transportnye sredstva. Trebovaniya k bezopasnosti v ekspluatatsii i metody proverki. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146241> (дата обращения: 18.08.2023).

11. Lozhkin V.N. Elektromekhanicheskij manipulyator dlya vyyavleniya avarijno-opasnyh rezhimov ekspluatatsii dizel'nyh mashin v usloviyah Arktiki // Ekstremal'naya robototekhnika. 2021. Т. 1. № 1. С. 123–130. DOI: 10.31776/ConfER.

Информация о статье:

Поступила в редакцию: 20.10.2023

Принята к публикации: 10.11.2023

The information about article:

Article was received by the editorial office: 20.10.2023

Accepted for publication: 10.11.2023

Информация об авторах:

Гавкалюк Богдан Васильевич, начальник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: rector@igps.ru, SPIN-код: 6390-5867

Ложкин Владимир Николаевич, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: vnlojkin@yandex.ru, SPIN-код: 9496-2451

Information about the authors:

Gavkalyuk Bogdan V., head of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: rector@igps.ru, SPIN: 6390-5867

Lozhkin Vladimir N., professor of the department of fire, emergency rescue equipment and automotive industry of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: vnlojkin@yandex.ru, SPIN: 9496-2451