

Научная статья

УДК 65(1-21):504.3.054:33814; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-41-49

ДИАГНОСТИКА МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПОЖАРНОЙ ОХРАНЫ С ПОМОЩЬЮ РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

Гавкалюк Богдан Васильевич;

✉ **Ложкин Владимир Николаевич.**

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

✉ vnlojkin@yandex.ru

Аннотация. На основе анализа состояния и развития методологии инструментального диагностирования в условиях эксплуатации пожарных автомобилей с дизельными поршневыми двигателями обосновываются преимущества роботизации динамического режима их нагружения в стандартной процедуре «свободного ускорения». Преимущества выявлены стендовыми испытаниями топливной аппаратуры полноразмерного автотракторного дизеля 4Ч11/12.5 путем изменения установочных регулировок топливоподачи в пределах значений, определенных в реальной эксплуатации. Исследованиями установлено, что применение робота-манипулятора позволяет вместе с обеспечением высокой степени воспроизводимости диагностической процедуры во времени установить явно выраженные закономерности изменения диагностических параметров топливоподачи и непосредственно (через рабочий процесс) связанных с ними оптической плотности (коэффициента абсорбции) и газового состава отработавших газов. Предложенный методологический подход диагностирования положительно протестирован на дизельных двигателях пожарных автомобилей различного конструктивного исполнения в реальных условиях применения.

Ключевые слова: мобильные средства пожаротушения, дизельный двигатель, техническое состояние, диагностика, роботизированный инструментарий

Для цитирования: Гавкалюк Б.В., Ложкин В.Н. Диагностика мобильных средств пожарной охраны с помощью робота-манипулятора динамического нагружения двигателя // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 1 (73). С. 41–49. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-41-49.

Scientific article

DIAGNOSTICS OF MOBILE FIRE PROTECTION EQUIPMENT USING A DYNAMIC ENGINE LOADING ROBOT-MANIPULATOR

Gavkalyuk Bogdan V.;

✉ **Lozhkin Vladimir N.**

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

✉ vnlojkin@yandex.ru

Abstract. The article substantiates the advantages of robotization of the dynamic mode of their loading in the standard procedure of «free acceleration» based on the analysis of the state and development of the methodology of instrumental diagnostics in the operating conditions of fire trucks with diesel piston engines. The advantages are revealed by bench tests of the fuel equipment of a full-size automotive and tractor diesel engine by changing the installation adjustments of the fuel supply within the values identified in real operation. The studies have established that the use of a robotic manipulator allows, along with ensuring a high degree of reproducibility

of the diagnostic procedure over time, to establish clearly expressed patterns of change in the diagnostic parameters of the fuel supply and, directly, through the work process, associated with them – optical density (absorption coefficient) and gas composition of exhaust gases. The proposed methodological approach to diagnostics has been positively tested on diesel engines of fire trucks of different designs in real conditions of use.

Keywords: mobile fire extinguishing equipment, diesel engine, technical condition, diagnostics, robotic tools

For citation: Gavkalyuk B.V., Lozhkin V.N. Diagnostics of mobile fire protection equipment using a dynamic engine loading robot-manipulator // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 1 (73). P. 41–49. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-41-49.

Введение. Состояние проблемы

Детали технических систем и агрегатов пожарных автомобилей (ПА), особенно топливной аппаратуры (ТА), в реальной эксплуатации подвержены естественному и «моральному» износу [1, 2]. Это сопровождается увеличением зазоров в сопрягаемых прецизионных элементах ТА, нарушением установочных регулировок, потерей свойств прочности и износостойкости и, в крайнем случае, отказам, выражающимся в экстремальной задымленности, эмиссии в воздушную среду с отработавшими газами (ОГ) токсичных химических веществ, перерасходу дизельного топлива, поломкам деталей на форсированных режимах эксплуатации ПА [3–5].

Современное развитие технологий пожаротушения [2, 6] и автомобилестроения [3, 5, 7] дает возможность установки на ПА систем и устройств повышенной сложности, а именно: бортовой диагностики, рециркуляции, нейтрализации и фильтрации ОГ, от исправности и качества обслуживания которых зависит не только санитарно-гигиеническая, но и пожарная безопасность самих ПА [2, 6, 8].

Логично ожидать, что отмеченные предаварийные режимы эксплуатации ТА ПА с последующими вероятными их отказами будут четче проявляться на неустановившихся динамических режимах работы дизельного двигателя ПА [2]. Процедура свободного ускорения (СУ), реализующая отмеченное утверждение, легла в основу международного стандарта – Межгосударственный стандарт ГОСТ 33997–2016 «Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки» (ГОСТ 33997–2016). Для определения физической природы нагружения дизельного двигателя ПА в режиме СУ ясность вносит работа авторов [9], в которой на примере деталей цилиндропоршневой группы, включая коленчатый вал (к/в) с маховиком (ЦПГ), детально исследованы силы и моменты инерции, возникающие при реализации (по ГОСТ 33997–2016) и на режиме СУ. Авторы [9] делают для практики ценный вывод: когда массы и моменты инерции элементов расчета ЦПГ незначительны, допустимо ограничиться статическим силовым анализом. В противном случае, особенно на высоких оборотах, для создания линейных или угловых ускорений, например различных элементов к/в, возникают значительные силы и крутящие моменты, что уже потребует (и в расчетах СУ) применения аппарата динамического анализа на основе второго закона Ньютона [9, 10].

Современное развитие робототехники закономерно потребовало для надежного воспроизведения диагностических циклов нагружения дизельного двигателя ПА в режиме СУ использовать автоматический манипулятор [7, 10]. Для совершенствования его конструкции, несомненно, полезными на практике могут оказаться исследования [10], в которых авторы поделились оригинальной разработкой метода расчета сил и моментов инерции, действующих на «робот» типа 2T9R. Метод расчета авторы осуществляют на основе второго закона Ньютона в программе MathCad с автоматизацией вычислительного процесса путем ввода данных посредством логической функции IFLOG.

Завершая обзорный анализ, можно сделать следующие выводы: поставленная задача разработки методов безразборной диагностики двигателей мобильных средств пожарной охраны по выявлению предаварийного технического состояния агрегатов ТА в целях контроля безотказного привода систем пожаротушения является актуальной. Необходимость ее решения определила цель настоящего исследования, направленного на адаптацию стандартизированной процедуры измерения дымности ОГ дизельных ПА с помощью оригинальных роботизированных устройств [7, 8].

Объекты и методика исследования

Экспериментальные исследования на нагрузочном стенде были организованы в ООО ЦНИТА (Санкт-Петербург). Объектами исследований являлись: полноразмерный двигатель с воспламенением от сжатия (дизель) Д-240Л (4Ч11/12.5), укомплектованный заводской топливной системой; плунжерный насос подачи топлива высокого давления УТН-5 (ТН) и электромеханический привод (рис. 1) автоматизированного (с помощью электронного блока управления) перемещения рычага топливного насоса (РТН).



Рис. 1. Электромеханический привод (1) и электронный блок управления (2) перемещения РТН

Конструкция механизма и кинематическая схема соединения его структурных элементов (рис. 2) описана в авторской работе [7].

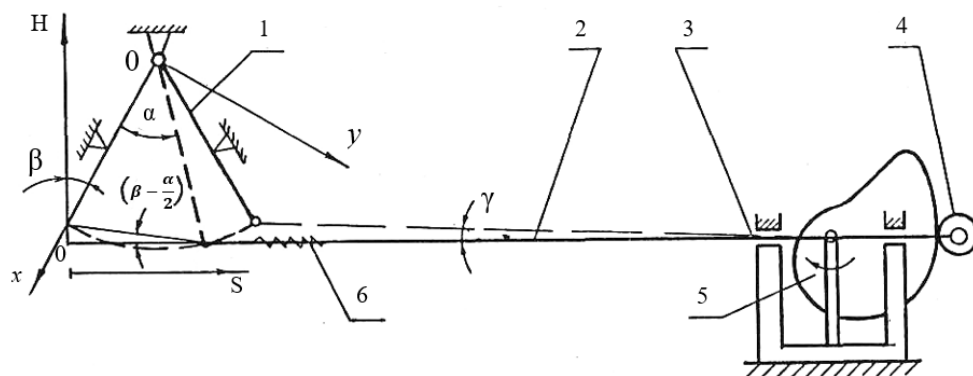


Рис. 2. Кинематическая схема механизма перемещения РТН дизеля 4Ч11/12.5:
1 – РТН; 2 – упругая тяга; 3 – шток-толкатель; 4 – роликовое соединение;
5 – «кулачковый» привод; 6 – пружина возврата

Для любого момента времени ускорение при «разгоне» дизеля определяется величиной разности значений моментов индикаторного и механических потерь, что соответствует величине эффективного крутящего момента M_e . При этом динамическая (инерционная) нагрузка на дизель в режиме СУ всецело определяется величиной развиваемого ускорения κ/ε , с^{-2} . Закон изменения ускорения κ/ε во времени $\varepsilon = f(t)$ на участке «разгона» дизеля в режиме СУ регулируется геометрическим профилированием контактной поверхности кулачка и винтами («упорами») крайних положений РТН в согласовании с параметрами настройки устройства всережимного регулирования частоты вращения κ/ε («регулятора всережимного»), геометрическими параметрами кинематической схемы привода РТН и интервалом времени перемещения его между «упорами» (рис. 2). По рекомендациям авторских работ [4, 7], в процессе СУ дизеля от минимально устойчивой угловой скорости коленчатого вала (УСКВ) на холостом ходу ω_{min}^{xx} , с^{-1} до максимальной УСКВ на холостом ходу ω_{max}^{xx} , с^{-1} закон $\varepsilon = f(t)$ должен обеспечивать продолжительность участка с постоянной амплитудой динамической нагрузки (ускорения) не менее чем в три раза больше (суммарно) участков с переменной нагрузкой (нарастающей на начальном участке и убывающей на завершающем участке).

В авторской работе [7] показано, что такое соотношение обеспечивается интервалом времени перемещения РТН между «упорами» (рис. 2) не более 0,5 с. При этом следует иметь в виду, что участок с постоянной амплитудой динамической нагрузки (ускорения) соответствует выходу дизеля в режиме СУ на регуляторную характеристику по топливоподаче, то есть достижению максимальных значений эффективного крутящего момента [7]. Принимая во внимание отмеченные рекомендации, можно записать уравнение для приблизительной оценки величины временного интервала, на котором осуществляется «разгон» дизеля в режиме СУ:

$$t_p \cong (\omega_{max}^{xx} - \omega_{min}^{xx}) / \varepsilon_9^H, \quad (1)$$

где ε_9^H – в работе [4] принято в качестве «эталонной» величины ускорение «разгона» дизеля (нагружения динамическим моментом – НДМ) в режиме СУ при «скачкообразном» (резко-интенсивном) перемещении РТН в первой (начальной) фазе интервала «разгона» t_p (1), а во второй (последующей) фазе – перемещения РТН по закону, близкому к «параболе». Такой двухфазный закон [4] обеспечивает особым профилированием контактной поверхности кулачка получение требуемого закона НДМ и достижение «номинального» значения инерционной мощности при результирующем значении $\varepsilon = \varepsilon_9^H$, с^{-2} (рис. 2).

Конструкцией насоса УТН-5 предусмотрены угловые перемещения (α) РТН (рис. 2) от 0° (крайнее его левое положение, соответствующее отключенной подаче топлива) до 120° – симметрично по отношению к вертикальной оси. При этом рабочий диапазон α РТН для дизеля Д-240Л ограничивается диапазоном $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$. Для данного рабочего диапазона α принимается переменный скоростной режим СУ дизеля в интервале значений УСКВ $\omega_1 = (0,6 \dots 0,7)\omega_{max}^{xx}$ и $\omega_2 = 0,95\omega_{max}^{xx}$.

Величины α_1 и α_2 при ранее указанных величинах УСКВ ω_1 и ω_2 предлагается оценивать путем установления зависимости $\alpha = f(\omega)$ или путем проведения эксперимента. Определение зависимости $\alpha = f(t_p)$ в интервале «разгона» дизеля в режиме СУ с обеспечением требуемого линейного характера увеличения УСКВ в диапазоне значений от ω_1 к ω_2 предлагается осуществить путем решения системы дифференциальных уравнений (2) собственно «безнаддувного дизеля» и регулятора всережимного κ/ε . Решение системы уравнений (2) выполняется относительно настройки всережимного регулятора по α при задаваемом постоянном для конкретной ступени регулирования (ст) значении углового ускорения «разгона» κ/ε ($d\omega/dt = \varepsilon_{cm} = \text{const}$):

$$\begin{aligned} 1. & d\omega/dt = (M_i - M_n)I_\delta; \\ 2. & d^2h/dt^2 = (-E + C - \gamma dh/dt)/\mu, \end{aligned} \quad (2)$$

где M_i – момент индикаторный, Н·м; M_n – момент потерь механических сопротивлений, Н·м; I_∂ – момент инерции, приведенный к к/в, кг·м²; ω – УСКВ, с⁻¹; h – координата по оси перемещения «рейки» топливного насоса, мм; E – сила, восстанавливающая положение РТН в регуляторе всережимном к/в, Н; C – сила, поддерживающая УСКВ в регуляторе всережимном к/в, Н; γ – коэффициент влияния сил вязкого трения, Н·с/мм; μ – масса движущихся деталей регулятора всережимного к/в, приведенная к его «муфте», кг; t – текущее, в процессе СУ, время, с.

Согласно исследованиям, проведенным в работе [4], величина момента инерции, приведенного к оси к/в I_∂ дизеля Д-240Л штатной заводской комплектации, составила на участке «выбега» (t_b) при отключении топливоподачи регулятором всережимным к/в, $I_\partial = 1,34$ кг·м².

Результаты исследования и обсуждение

На рис. 3 показаны результаты выявленных путем безмоторных стендовых испытаний закономерностей изменения цикловой подачи топлива ТН УТН-5У дизеля Д-240Л в зависимости от регулировки хода рейки h , мм (рис. 2).

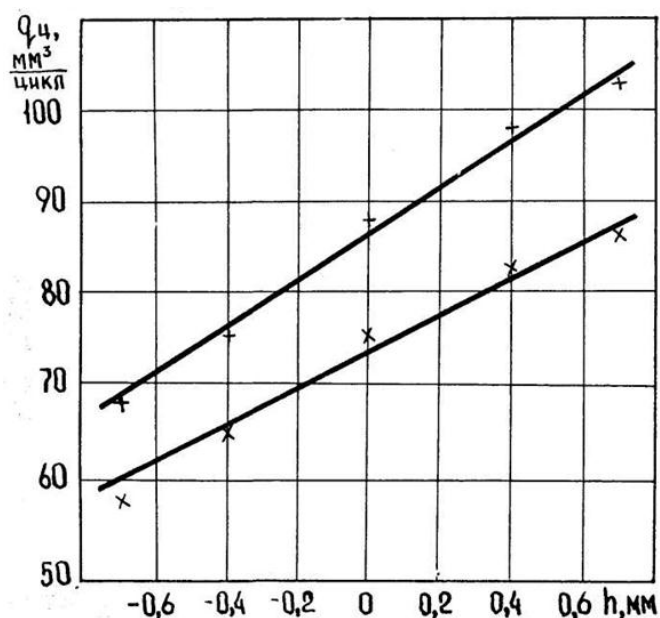


Рис. 3. Изменение g_u , мм³/цикл ТН УТН-5У от регулировки «упора рейки» относительно положения номинальной g_u (+---+ - $n = 700$ мин⁻¹; x---x - $n = 1100$ мин⁻¹)

Диапазон отклонений h (рис. 2) взят из статистических исследований разрегулировок топливоподачи, характерных для реальной эксплуатации [4].

Уменьшение цикловой подачи относительно требований завода-изготовителя дизелей приведет к потере крутящего момента и мощности, что негативно скажется на работоспособности мобильной пожарной техники. Завышение цикловой подачи отрицательно проявится на расходе топлива, ресурсе и показателях токсичности ОГ. Следовательно, диагностическое выявление данного вида неисправности ТА (в форме отклонений часового расхода, цикловой дозы и неравномерности подачи топлива от стандартной регуляторной характеристики (рис. 4) предлагаемым методом СУ актуально.

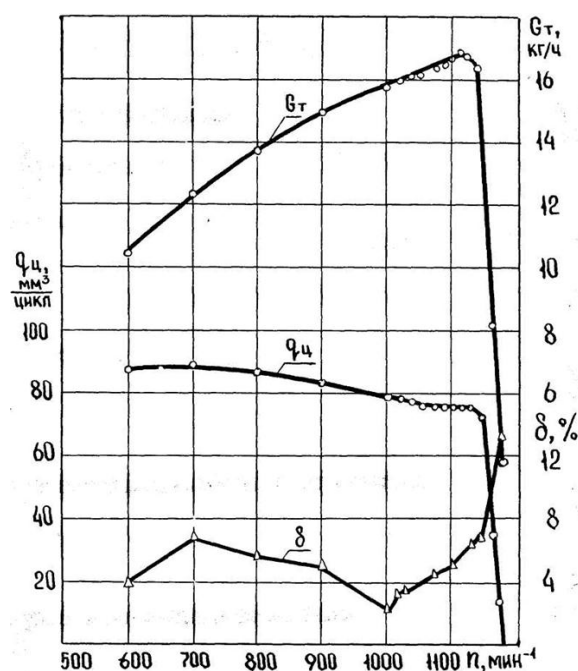


Рис. 4. Изменение параметров подачи топлива по стандартной регуляторной характеристике ТН УТН-5У

На рис. 5 показаны результаты тестирования работоспособности предлагаемого метода контроля параметров дизеля Д-240Л с помощью робота-манипулятора при «аварийных» отклонениях $q_{ц}$ от значения $56 \text{ мм}^3/\text{цикл}$ (для разных интервалов перемещения РТН τ , с).

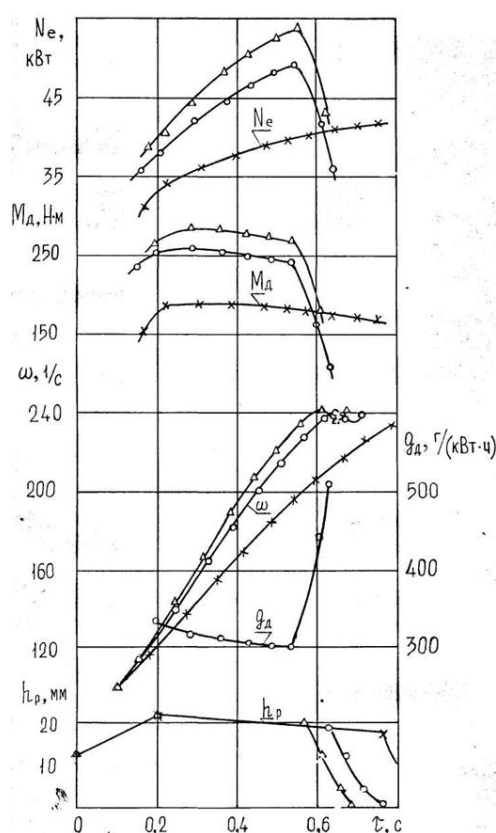


Рис. 5. Изменение момента динамического нагружения M_d , мощности N_e , УСКВ к/в ω , потребления топлива удельного g_d и координаты рейки ТН h_p дизеля Д-240Л на режимах СУ при отклонениях $q_{ц}$ (x---x – $q_{ц} = 56 \text{ мм}^3/\text{цикл}$; o---o – $q_{ц} = 72 \text{ мм}^3/\text{цикл}$; Δ---Δ – $q_{ц} = 88 \text{ мм}^3/\text{цикл}$)

Как показали испытания, проведенные в авторских работах [2, 4, 7], устранение аварийного отклонения $q_{ц}$ путем регулировки от значения 72 мм³/цикл до значения 56 мм³/цикл (рис. 5) сопровождается уменьшением НДМ на 73 Н·м (30 %), мощности эффективной на 13,7 кВт (25,8 %) и длительности неустойчивого состояния двигателя на 0,24 с (42 %). Это сопровождается уменьшением дымности ОГ на 26 ед. (62,6 %), содержания в ОГ CO₂ на 0,05 % (3,2 %), оксида углерода (CO) на 182 млн⁻¹ (25,6 %), азота оксидов (NO_x) на 29 млн⁻¹ (28 %) и углеводородных соединений (CH) на 62 млн⁻¹ (33,4 %).

Заключение

Разработан и протестирован оригинальный метод диагностики мобильных средств пожарной охраны с помощью робота-манипулятора динамическим нагружением дизеля. Его рекомендуется использовать применительно к условиям эксплуатации мобильной пожарной техники с приводом от поршневых дизельных двигателей.

Список источников

1. Иванов К.С., Реснянский С.Г., Мороз Н.А. Влияние динамических нагрузок на прочность деталей машин и режимы движения пожарных автомобилей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 3. С. 75–80. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-75-80.
2. Гавкалюк Б.В., Ложкин В.Н., Смирнов А.С. Теория и практика обеспечения безопасности применения в условиях чрезвычайных ситуаций силовых установок пожарных автомобилей 4-5 поколений // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 2 (66). С. 8–15.
3. Современные методы испытаний транспортных средств на экологическую безопасность / Д.А. Загарин [и др.] // Труды НАМИ. 2022. № 2 (289). С. 34–40. DOI: 10.51187/0135-3152-2022-2-34-40.
4. Фомичев А.И. Комплексный метод оперативного контроля топливных и экологических показателей работы тракторных дизелей в условиях эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1990. 186 с.
5. Болдин А.П., Сарбаев В.И., Чусова А.С. Возможности эксплуатационного диагностирования автомобилей Mercedes-Benz Sprinter специального назначения для повышения эффективности процессов и текущего ремонта, осуществляемых на автотранспортном предприятии в кооперации с фирменными СТО // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2020. № 4 (63). С. 3–13.
6. Осипов Д.В. Методика прогнозирования эффективности и пожарной безопасности нейтрализаторов транспортных средств: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 162 с.
7. Ложкин В.Н. Электромеханический манипулятор для выявления аварийно-опасных режимов эксплуатации дизельных машин в условиях Арктики // Экстремальная робототехника. 2021. № 1 (32). С. 123–130.
8. Сацук И.В. Закономерности распределения и технического состояния эксплуатируемых пожарных автомобилей по показателям конструктивной безопасности силовых установок // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 2 (25). С. 31–38.
9. Dr. Aung Ko Latt, Dr. Than Naing Win. Dynamic Force Analysis of Diesel Engine Crankshaft // Iconic Research and Engineering Journals. 2019. № 3 (2). S. 606–611.
10. Comanescu A., Rotaru A., Petrescu F.I.T. Study of forces in a 2T9R robot mechanism // Independent Journal of Management and Production. 2021. № 12 (9). S. 741–773. DOI: 10.14807/ijmp.v12i9.1554.

References

1. Ivanov K.S., Resnyanskij S.G., Moroz N.A. Vliyanie dinamicheskikh nagruzok na prochnost' detalej mashin i rezhimy dvizheniya pozharnyh avtomobilej // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2022. № 3. S. 75–80. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-75-80.
2. Gavkalyuk B.V., Lozhkin V.N., Smirnov A.S. Teoriya i praktika obespecheniya bezopasnosti primeneniya v usloviyah chrezvychajnyh situacij silovyh ustanovok pozharnyh avtomobilej 4-5 pokolenij // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 2 (66). S. 8–15.
3. Sovremennye metody ispytaniy transportnyh sredstv na ekologicheskuyu bezopasnost' / D.A. Zagarin [i dr.] // Trudy NAMI. 2022. № 2 (289). S. 34–40. DOI: 10.51187/0135-3152-2022-2-34-40.
4. Fomichev A.I. Kompleksnyj metod operativnogo kontrolya toplivnyh i ekologicheskikh pokazatelej raboty traktornyh dizelej v usloviyah ekspluatatsii: dis. ... kand. tekhn. nauk. L., 1990. 186 s.
5. Boldin A.P., Sarbaev V.I., Chusova A.S. Vozmozhnosti ekspluatatsionnogo diagnostirovaniya avtomobilej Mercedes-Benz Sprinter special'nogo naznacheniya dlya povysheniya effektivnosti processov i tekushchego remonta, osushchestvlyaemyh na avtotransportnom predpriyatii v kooperatsii s firmennymi STO // Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI). 2020. № 4 (63). S. 3–13.
6. Osipov D.V. Metodika prognozirovaniya effektivnosti i pozharnej bezopasnosti nejtralizatorov transportnyh sredstv: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2011. 162 s.
7. Lozhkin V.N. Elektromekhanicheskij manipulyator dlya vyyavleniya avarijno-opasnyh rezhimov ekspluatatsii dizel'nyh mashin v usloviyah Arktiki // Ekstremal'naya robototekhnika. 2021. № 1 (32). S. 123–130.
8. Sacuk I.V. Zakonomernosti raspredeleniya i tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemyh pozharnyh avtomobilej po pokazatelyam konstruktivnoj bezopasnosti silovyh ustanovok // Sibirskij pozharно-spasatel'nyj vestnik. 2022. № 2 (25). S. 31–38.
9. Dr. Aung Ko Latt, Dr. Than Naing Win. Dynamic Force Analysis of Diesel Engine Crankshaft // Iconic Research and Engineering Journals. 2019. № 3 (2). S. 606–611.
10. Comanescu A., Rotaru A., Petrescu F.I.T. Study of forces in a 2T9R robot mechanism // Independent Journal of Management and Production. 2021. № 12 (9). S. 741–773. DOI: 10.14807/ijmp.v12i9.1554.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 20.02.2025; одобрена после рецензирования: 11.03.2025;
принята к публикации: 14.03.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 20.02.2025; approved after review: 11.03.2025;
accepted for publication: 14.03.2025

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., supervisor 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, rescue equipment and automobile economy 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