

Научная статья

УДК 65(1-21):504.3.054:33814656.1:628.517.2; DOI: 10.61260/2218-130X-2025-4-42-53

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ДИЗЕЛЬНЫХ ПОЖАРНЫХ МАШИН РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ

✉ Ложкин Владимир Николаевич.

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

Сацук Иван Владимирович.

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Железногорск, Россия

✉ vnlojkin@yandex.ru

Аннотация. Приводится критический анализ развития подхода безразборного диагностирования топливной аппаратуры и двигателей пожарных машин с помощью электронно-управляемого робота-манипулятора в условиях эксплуатации. В теоретическую концепцию подхода авторами положены эмпирические связи между временным интервалом «разгона» дизеля в режиме свободного ускорения, угловыми скоростями коленчатого вала и условно «эталонным» значением его ускорения в стандартизованном режиме полной подачи топлива. Дальнейшим развитием теории нового подхода в области экологической безопасности рассматривается математическое выражение «мгновенной» инерционной нагрузки функцией, оригинальным образом суммирующей функции-аргументы основных составляющих динамического «сопротивления» в режиме свободного ускорения. Расчет этих составляющих позволяет с достаточной степенью достоверности рассчитывать значения «технических нормативов экологической безопасности». Применением подхода в исследованиях на дизеле Д-240Л установлено значение момента сопротивления. Статистическими исследованиями на 82 пожарных машинах установлена «значимость» зависимости дымности от пробега, подтвержден нормативный диапазон дымности для исправных пожарных машин и ожидаемая величина предотвращенного ущерба от перерасхода топлива до 64,6 т в год.

Ключевые слова: экология, пожарная машина, двигатель, свободное ускорение, инерционное сопротивление, моделирование, дымность, диагностика и диагностирование

Для цитирования: Ложкин В.Н., Сацук И.В. Экологическая диагностика дизельных пожарных машин роботом-манипулятором в динамическом режиме нагружения // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2025. № 4. С. 42–53. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-4-42-53.

Scientific article

**ENVIRONMENTAL DIAGNOSTICS OF DIESEL FIRE TRUCKS
BY A ROBOT-MANIPULATOR IN DYNAMIC LOADING MODE**

✉ Lozhkin Vladimir N.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia.
Satsuk Ivan V.

Siberian fire and rescue academy of EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

✉ vnlojkin@yandex.ru

Abstract. This article presents a critical analysis of the development of an approach for in-place diagnostics of fire engine fuel systems and engines using an electronically controlled robotic manipulator under operating conditions. The authors' theoretical concept of this approach is based on empirical relationships between the time interval of a diesel engine's «acceleration» in free acceleration mode, the angular velocities of the crankshaft and the conventional «reference» value of its acceleration in the standardized mode of full fuel delivery. A further development of the theory of a new approach in the field of environmental safety is considered in the mathematical expression of the «instantaneous» inertial load as a function that, in an original way, sums up the argument functions of the main components of the dynamic «resistance» in the control system mode. Calculating these components is the engineering output of a scientific approach that allows for the reliable calculation of «technical environmental safety standards». Applying this approach to research on a D-240L diesel engine resulted in a drag moment value. Statistical studies on 82 PAs established the significance of the smoke emission dependence on mileage, confirming the standard smoke emission range for serviceable Fire Trucks and the expected value of prevented damage from excess fuel consumption of up to 64.6 tons per year.

Keywords: ecology, fire engine, engine, free acceleration, inertial resistance, modeling, smoke, diagnostics and diagnosis

For citation: Lozhkin V.N., Satsuk I.V. Environmental diagnostics of diesel fire trucks by a robot-manipulator in dynamic loading mode // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2025. № 4. P. 42–53. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-4-42-53.

Введение. Состояние проблемы

С развитием мирового двигателестроения, характеризующимся ужесточением экологических требований к выбросу вредных (загрязняющих) веществ и парниковых газов [1], требования к точности и воспроизводимости результатов диагностических экспериментальных исследований [2], включая безразборные, по составу и дымности отработавших газов, применительно и к поршневым двигателям пожарных машин (ПМ) [3], будут непрерывно возрастать. Авторские статистические исследования распределения ПМ по дымности, как интегрального экологического критерия, в Красноярском Крае России [4] позволили сделать стратегический вывод в область диагностики о том, что детали агрегатов комбинированных поршневых двигателей ПМ, в частности цилиндропоршневой группы, топливной аппаратуры (ТА), систем газораспределения, в условиях интенсивной эксплуатации подвержены естественному механическому и «моральному» износу [5]. Это приводит к превышению значений предельных зазоров в уплотнительных и маслосъемных поршневых кольцах [6], недопустимым изменениям геометрии сопрягаемых поверхностей прецизионных элементов ТА, потере контактной твердости и износостойкости трущихся поверхностей в кулачковых приводах клапанов, а в аварийных случаях – к отказам этих систем, агрегатов и деталей, сопровождаемых [7] экстремальной задымленностью

отработавших газов, выбросом в атмосферу опасных токсичных и канцерогенных веществ, парниковых газов [8, 9], перерасходу горючего [10], в пределе, с высокой степенью достоверности, – к возгоранию нейтрализатора или сажевого фильтра ПМ [11], поломкам деталей и остановке двигателя ПМ, невозможности подачи огнетушащих реагентов на источник пожара [12].

Развитие техники и технологий диагностирования экологических свойств двигателей ПМ происходило как адаптация к изменению их конструкций, соответственно, ужесточающимся требованиям по шкале экологических классов, 2–5, 6, 7 [13], путем установки на двигатели ПМ электронно-управляемых систем и устройств повышенной структурной сложности, а именно: цифровой диагностики, рециркуляции, нейтрализации, фильтрации отработавших газов (ОГ) на каталитических принципах и т.д. От их исправности, своевременности обслуживания и качества моторного топлива в эксплуатации зависела комплексная, в частности, экологическая безопасность их применения на ПМ при движении в городском потоке или боевой работе [13].

Разумно предвидеть, что аварийные режимы эксплуатации, например, ТА ПМ с последующими неизбежными ее отказами будут отчетливее проявляться и прогнозироваться на неустановившихся динамических режимах работы дизельного двигателя ПМ [2, 13]. Процедура испытаний на режиме свободного ускорения (СУ) дизеля без внешней нагрузки, реализующая ранее описанную научно-прикладную гипотезу, легла в основу международного стандарта – Межгосударственный стандарт ГОСТ 33997–2016 Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки. Определенную ясность в понимание физической природы режима СУ вносит теоретико-прогностическое исследование авторов [14]. В нем, на примере цилиндропоршневой группы деталей быстроходного дизельного двигателя, детально исследованы силы и моменты инерции, возникающие при его ускорении. Они делают для практики ценный вывод: когда массы и моменты инерции элементов расчета цилиндропоршневой группы незначительны, допустимо ограничиться статическим силовым анализом. В противном случае, особенно на высоких оборотах, для создания линейных или угловых ускорений, например различных элементов коленчатого вала (к/в), возникают значительные силы и крутящие моменты, что уже потребует применения аппарата динамического анализа на основе второго закона Ньютона.

Полезными для обоснования режима СУ могут оказаться исследования [15], в которых авторы поделились оригинальной разработкой метода расчета сил и моментов инерции, действующих на «робот» типа 2Т9R. Метод расчета авторы осуществляют на основе второго закона Ньютона в программе MathCad с автоматизацией вычислительного процесса путем ввода данных посредством логической функции IFLOG. Роботизация процесса нагружения двигателя в режиме СУ [16] путем минимизации влияния на данные измерения дымности «человеческого фактора» повысила бы объективность контроля критериев конструктивной безопасности дизельных двигателей ПМ при помощи авторского робота-манипулятора [17].

Таким образом, проведенный критический анализ состояния исследуемого вопроса выявил актуальность решения научно-прикладной задачи разработки метода безразборной диагностики негативного экологического воздействия отработавших дымовых газов дизельных двигателей ПМ на человека, окружающую среду и изменение климата путем контроля дымности в режиме СУ как интегрального «*технического норматива выброса*» по определению Федерального закона Российской Федерации от 4 мая 1999 г. «Об охране атмосферного воздуха» (ФЗ №96-ФЗ) (в редакции от 8 августа 2024 г.).

Цель исследования: разработка и обоснование инструментального метода контроля дымности ОГ как показателя, закономерно связанного с расходом/перерасходом дизельного топлива, внедрение которого в процесс технического обслуживания ПМ путем устранения выявленных неисправностей дизелей сократит расход дизельного топлива в парках ПМ.

Задачи исследования: по статистике измерений дымности установить корреляционную связь между общим пробегом ПМ, дымностью ОГ, перерасходом топлива

и уточнить физико-математическую модель оценки мощности инерционного торможения дизеля по измеряемым и расчетным его параметрам в режиме СУ с обоснованием перспективы углубленного контроля экологических свойств дизелей ПМ путем интеграции в диагностический цикл фазы «выбега» дизеля с приобретением возможности экспериментальной оценки инерционной мощности и механических потерь.

Методы, результаты исследования и их обсуждение

Для достижения поставленной цели и решения задач в работе применялся комплекс теоретических и экспериментальных методов исследования. Экспериментальные исследования на нагрузочном стенде были организованы и проведены в ООО «ЦНИТА» (Санкт-Петербург) [18]. Объектами исследований в данной серии изысканий были: 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 автоматизированного (с помощью электронного блока управления) перемещения рычага топливного насоса.

В отмеченной авторской работе [18] можно найти подробное описание теоретической концепции подхода, уравнения эмпирических связей между временным интервалом «разгона» дизеля в режиме СУ t_p , угловыми скоростями к/в $\omega_{max}^{x.x}$, $\omega_{min}^{x.x}$ и условно «эталонным» значением его ускорения ε_3^H в стандартном нагрузочном цикле на режиме полной топливоподачи.

Установление временной зависимости углового перемещения рычага топливоподачи $\alpha = f(t_p)$ в цикле «разгона» дизеля на режиме СУ с обеспечением требуемого линейного характера увеличения угловой скорости к/в в рабочем диапазоне значений ω осуществляется решением системы дифференциальных уравнений (1), записанной для «безнаддувного дизеля» и всережимного регулятора скорости вращения к/в. Оно выполняется относительно настройки всережимного регулятора по углу перемещения рычага топливоподачи α при задаваемом постоянном для каждой из ступеней регулирования (ст) численном значении углового ускорения к/в ($d\omega/dt = \varepsilon_{ст} = Const$):

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

где M_i – развиваемый индикаторный момент, Н·м; M_n – момент механических потерь, Н·м; I_d – момент инерции, приведенный к к/в, кг·м²; ω – угловая скорость к/в, с⁻¹; h – координата по оси перемещения «рейки» топливного насоса высокого давления, мм; E – сила, восстанавливающая положение рычага топливоподачи в регуляторе всережимном к/в, Н; C – сила, поддерживающая угловую скорость к/в в регуляторе всережимном к/в, Н; γ – коэффициент вязкого трения, Н·с/мм; μ – масса движущихся элементов регулятора скорости к/в, приведенная к соединительной «муфте», кг; t – текущее значение времени при реализации режима СУ, с.

Полная подача топлива обеспечивает такие значения ускорения к/в, при которых развиваемые инерционные нагрузки выводят дизель на внешнюю регуляторную характеристику, но только индикаторной, а не эффективной мощности, поскольку отсутствует внешняя по отношению к дизелю, нагрузка.

Дальнейшим развитием теории нового подхода в область экологической безопасности рассматривается математическая формализация уравнения (закона) для «мгновенной» инерционной нагрузки, оригинальным образом суммирующего функции-аргументы основных составляющих динамического «сопротивления» в режиме СУ (1) [19, 20].

$$N_{cy} = ((I_B + I_M + I'_{ш} + I'_C + I'_{кп}) \times \varepsilon + f \times \omega) \times \omega, \quad (2)$$

где N_{cy} – фактическая мощность пожарного автомобиля на режиме свободного ускорения, Вт; I_B – момент инерции к/в, $\text{кг} \times \text{м}^2$; I_M – момент инерции маховика, $\text{кг} \times \text{м}^2$; $I'_{ш}$ – приведенный момент инерции шатунов и элементов поршневой группы, $\text{кг} \times \text{м}^2$; I'_C – приведенный момент инерции дисков сцепления, $\text{кг} \times \text{м}^2$; $I'_{кп}$ – приведенный момент инерции первичного вала коробки передач, $\text{кг} \times \text{м}^2$; ε – угловое ускорение вала двигателя, $\text{рад}/\text{с}^2$; f – коэффициент вязкого трения и обобщенных внутренних потерь, $\text{Вт} \times \text{с}^2/\text{рад}^2$; ω – угловая скорость вала двигателя, $\text{рад}/\text{с}$.

Моменты инерции деталей дизеля уравнения (2) для конкретной модели ПМ являются постоянными и зависят от их массы, распределения массы относительно оси вращения, геометрической конфигурации деталей и плотности материала, из которых они изготовлены. Расчет этих составляющих является инженерным выходом научного подхода, позволяющего, по сути, путем применения аппарата динамического анализа на основе второго закона Ньютона, с достаточной степенью достоверности рассчитывать через значения линейных или угловых ускорений (например, для различных конструктивных элементов к/в) вначале развиваемые силы и крутящие моменты, а затем значения «мгновенных» индикаторных мощностей.

По результирующим значениям индикаторной мощности уравнения (2) можно с использованием авторского аппарата уравнений множественной регрессии [13] продиагностировать, соответствующие им значения выбросов с дымовыми газами вредных (загрязняющих) веществ и сопоставить эти значения с «техническими нормативами выбросов» (ФЗ №96-ФЗ). Например, CO , CH , NO_x , K , а также расходом/перерасходом топлива (для контролируемого парка ПМ [4]).

Проведенные экспериментальные исследования были направлены на решение двух ключевых задач:

- 1) Подтверждение гипотезы о повышении достоверности диагностирования при автоматизации режима СУ;
- 2) Верификация комплексного диагностического подхода, связывающего дымность ОГ с динамическими характеристиками двигателя и пробегом ПМ.

Для оценки влияния «человеческого фактора» на воспроизводимость результатов замера дымности была проведена серия сравнительных испытаний на АЦ-6,0-40 (5557) с двигателем ЯМЗ-53623. Десять циклов измерений дымности были выполнены с участием водителя-оператора, и десять – с использованием разработанного устройства скоростного режима двигателя (УСРД). Результаты представлены на рис. 1.

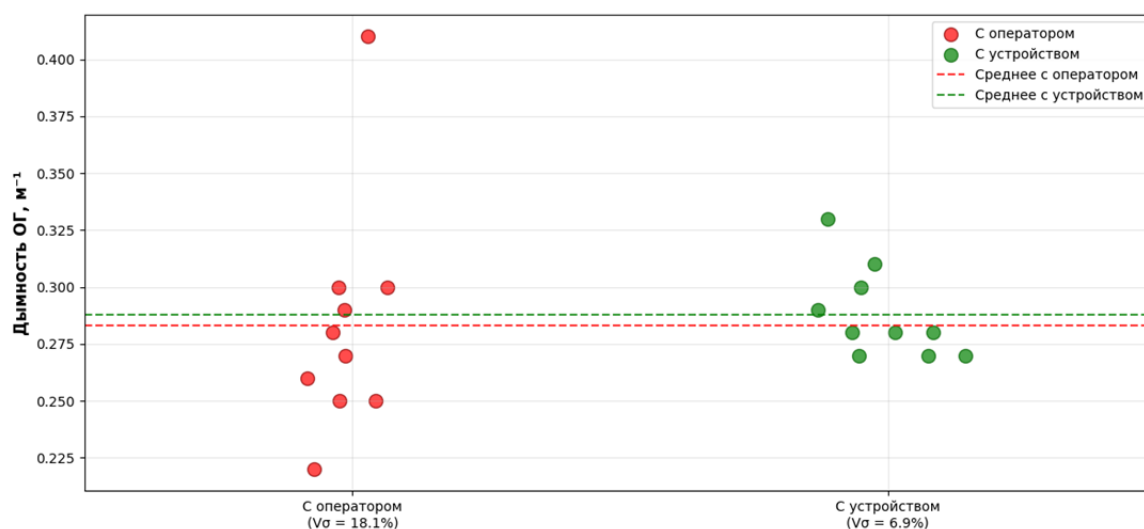


Рис. 1. Результаты замеров дымности ОГ на АЦ-6,0-40 (5557)

Как видно из рис. 1, использование устройства УСРД позволило снизить коэффициент вариации (V_{σ}) с 18,1 % до 6,9 %. Это доказывает, что автоматизация процесса формирования режима СУ позволяет получать статистически значимо более стабильные и воспроизводимые результаты, что критически важно для корректного отслеживания изменений технического состояния двигателя во времени.

Для установления нормативных диапазонов дымности был проведен статистический анализ результатов проверки 41 современных ПМ (Евро-4, Евро-5) пожарно-спасательных гарнизонов Красноярского края (рис. 2).

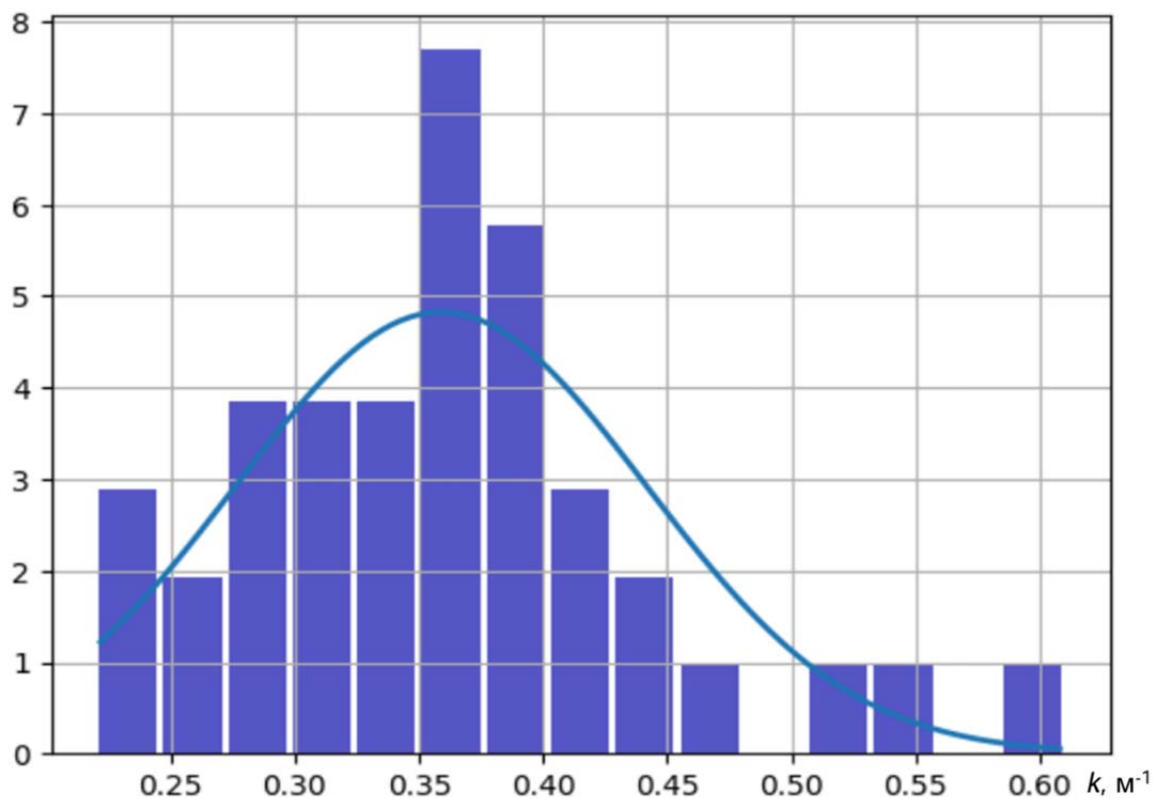


Рис. 2. Плотность нормального распределения вероятности дымности ОГ дизелей ПА стандартов Евро-4 и Евро-5 в режиме СУ

Распределение значений дымности для данной выборки соответствует нормальному закону (уровень значимости по критерию Колмогорова составил $p > 0,05$). Было установлено, что для технически исправных ПМ 4–5 экологических классов типичный уровень дымности ОГ на режиме СУ лежит в диапазоне от 0,11 до 0,6 m^{-1} ($\bar{k} + 3\sigma$).

Данный диапазон может служить базовым критерием при проведении оперативного контроля. Превышение верхней границы с высокой вероятностью свидетельствует о наличии неисправности, требующей углубленного диагностирования. Сравнение с данными, полученными в 2005 г. для парка ПМ Ленинградской обл. (преимущественно без экологического класса), где средняя дымность составляла 4,36 m^{-1} при размахе вариации до 8,1 m^{-1} [20], наглядно демонстрирует положительную динамику, связанную с обновлением парка и внедрением систем нейтрализации ОГ.

Для выявления интегрального показателя износа была проанализирована зависимость дымности ОГ от общего пробега ПМ ($S_{\text{общ}}$), который учитывает как пробег по спидометру, так и наработку двигателя в стационарном режиме (рис. 3).

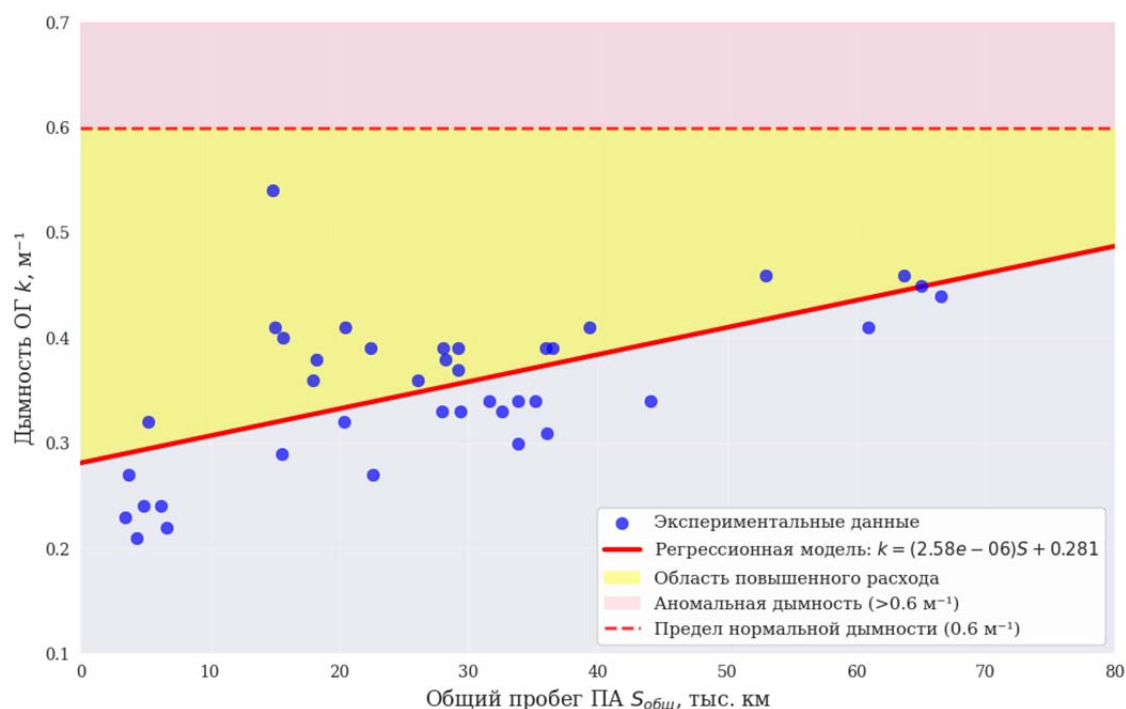


Рис. 3. Регрессионная модель зависимости дымности ОГ от пробега ПМ

Полученная эмпирическая зависимость согласуется с данными исследований влияния эксплуатационных факторов на эмиссию частиц авторов [21, 22], где также отмечается прогрессирующее увеличение выбросов сажи по мере наработки двигателя. При этом, как и в рассматриваемом случае, наблюдался значительный разброс данных, обусловленный индивидуальными особенностями эксплуатации и технического обслуживания. Однако значительный разброс точек относительно линии тренда (коэффициент детерминации $R^2 = 0,65$) указывает на то, что один только пробег не является единственным фактором.

Отклонение фактической дымности от расчетной [20] является важным диагностическим признаком, позволяющим выявить ПМ, техническое состояние которых хуже среднестатистического для их пробега.

Верификация комплексного подхода была проведена на примере диагностирования двух ПМ: АЦ-3,2-40/4 (43265) и АЦ-3,2-40/4 (43253). Результаты диагностирования представлены в таблице.

Таблица

Сравнительные данные для комплексного диагностирования ПМ

Параметр	Маркировка ПМ, ДВС	
	АЦ-3,2-40/4 (43265), Cummins ISB6.7E5310	АЦ-3,2-40/4 (43253), Cummins ISBe210
Фактическая дымность (k), м^{-1}	0,30	0,55
Расчетная дымность по пробегу ($k_{\text{расч}}$), м^{-1}	0,32	0,36
Отклонение $\Delta k = k - k_{\text{расч}}$, м^{-1}	-0,02 (в пределах погрешности)	+0,19 (аномалия)
Соответствие мощности внешней скоростной характеристике	Полное	Периодические отклонения

Для АЦ на базе шасси КамАЗ 43265 все параметры находились в норме: дымность соответствовала расчетной для его пробега, а динамика мощности не имела аномалий. Это указывало на исправное техническое состояние.

Выявленная на АЦ с шасси КамАЗ 43253 совокупность признаков (аномальный рост дымности и нестабильность мощности) позволила сформировать диагностическую гипотезу о нарушении работы системы EGR. Последующая углубленная проверка подтвердила закоксовывание клапана EGR углеродистыми отложениями. Данная неисправность не только повышает выбросы NO_x и сажи, но и приводит к нарушению теплового баланса системы. Нарушение рециркуляции меняет температурный режим и состав смеси на входе в каталитический нейтрализатор, выводя его из оптимального рабочего диапазона (200–800 °C) [2]. Длительная работа в таком аварийном режиме, особенно на стационарных режимах, когда корпус нейтрализатора не обдувается воздухом, чревата его перегревом до температур, способных вызвать оплавление керамических блоков-носителей и воспламенение скопившейся в подкапотном пространстве горючих саже-смолистых нефтепродуктов, что создает прямую пожарную опасность, пример которой показан на рис. 4 [13].



Рис. 4. Пример разрушения блока-носителя каталитического нейтрализатора при нештатном (аварийном) режиме [13]

Применением подхода в экспериментально-расчетных исследованиях на ранее упомянутом в источнике [18] дизеле Д-240Л было установлено значение момента сопротивления $I_d = 1,34 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Как показали изыскания, выполненные в авторских работах [3, 4, 18], устранение экстремального отклонения цикловой дозы дизельного топлива q_d посредством регулирования от величины 72 $\text{мм}^3/\text{цикл}$ до величины 56 $\text{мм}^3/\text{цикл}$ приводит к уменьшению нагружения дизеля динамическим моментом на 73 Н·м (30 %), инерционной мощности на 13,7 кВт (25,8 %) и продолжительности переходного состояния дизеля на 0,24 с (42 %). Это приводит к сокращению дымности ОГ на 26 ед. (62,6 %), концентрации в ОГ CO_2 на 0,05 % (3,2 %), оксида углерода (CO) на 182 млн^{-1} (25,6 %), оксидов азота (NO_x) на 29 млн^{-1} (28 %) и летучих углеводородов (CH) на 62 млн^{-1} (33,4 %).

Перспективным развитием метода является комплексный анализ режимов «разгона» и «выбега» [18]. Динамика «разгона» характеризует способность двигателя, развивая индикаторную мощность, совершить определенную работу, преодолевая инерционное сопротивление возвратно-поступательно движущихся и вращающихся масс (в первом случае с линейными, во втором – с угловыми «положительными» ускорениями) в сумме с сопротивлением сил механического, в частности гидравлического, трения. Динамика «выбега» после «разгона» характеризует способность двигателя с выключенной подачей топлива в условиях отсутствия индикаторного крутящего момента теми же, по инерции, возвратно-поступательно движущимися и вращающимися массами (в первом случае

с линейными, во втором – с угловыми «отрицательными ускорениями»), совершить также определенную работу на преодоление сопротивления тех же сил механического, в частности гидравлического, трения к моменту восстановления исходной частоты вращения коленчатого вала холостых ходов двигателя.

Применение методов «разгона» в режиме СУ с «выбегом» и, например, метода «отключения» цилиндров двигателя с использованием робота-манипулятора позволит экспериментальным путем определить индикаторную мощность N_{cy} (уравнение (1), что открывает в перспективе широкие возможности для прогнозирования экологических свойств двигателей пожарных автомобилей, удовлетворяющих разработанной методике их контроля [18] на соответствие «техническим нормативами выбросов» (ФЗ №96-ФЗ), например, по CO, CH, NO_x, K, выбросу парниковых газов, а также расходу/перерасходу топлива (для контролируемого парка ПМ [4]).

Заключение

Проведенное исследование позволило разработать и научно обосновать роботизированный инструментальный метод, направленный на решение актуальных задач, связанных с контролем и диагностикой эколого-технического состояния дизельных двигателей пожарных машин. Метод путем выполнения научно обоснованной процедуры испытаний на режиме свободного ускорения по оригинальной программе для ЭВМ с помощью робота-манипулятора оригинальной конструкции позволяет с достаточной степенью достоверности прогнозировать экологические свойства дизельных двигателей ПМ на их соответствие «техническому нормативу выброса» (ФЗ №96-ФЗ и ГОСТ 33997–2016) *отработавших дымовых газов*, содержащих опасные токсичные и канцерогенные вещества, такие как CO, CH, NO_x, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, бензо(а)пирен – C₂₀H₁₂, парниковые вещества. Метод позволяет также путем косвенного, по дымности ОГ на режиме СУ, контроля потребления топлива производить оценку предотвращенного экологического ущерба от перерасхода дизельного топлива парком ПМ в эксплуатации.

Список источников

1. Галимова К.Р. Экологическая безопасность в эксплуатации пожарной и аварийно-спасательной техники // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 108-10. С. 27–29. DOI: 10.18411/trnio-04-2024-530. EDN QQCEIE.
2. Обзор и анализ испытательного оборудования на базе одноцилиндрового отсека для доводки рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания / Г.С. Корнилов [и др.] // Двигателестроение. 2025. № 3 (301). С. 3–13.
3. Ложкин В.Н. Электромеханический манипулятор для выявления аварийно-опасных режимов эксплуатации дизельных машин в условиях Арктики // Экстремальная робототехника. 2021. № 1 (32). С. 123–130.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Ложкина О.В., Мальчиков К.Б. Сравнительный анализ содержания поллютантов в отработавших газах силовых установок маломерных судов и автотранспортных средств // Двигателестроение. 2024. № 1 (295). С. 21–32.

8. Трофименко Ю.В., Филиппова Р.В., Феньков И.А. Зарубежный опыт внедрения электробусного транспорта в мегаполисах: переход на низкоуглеродные транспортные средства // Мир транспорта и технологических машин. 2025. № 2-1 (89). С. 87–92. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-1(89)-87-92.
9. Ложкина О.В. Мониторинг и прогнозирование опасного техногенного загрязнения атмосферы парниковыми газами транспорта / под общ. ред. Б.В. Гавкалюка. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023. 166 с.
10. 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.
11. Осипов Д.В. Методика прогнозирования эффективности и пожарной безопасности нейтрализаторов транспортных средств: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. 162 с.
12. 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.
13. Ложкин В.Н. Обеспечение пожарной безопасности сложных электронно-управляемых термokatалитических систем: теоретические основы, диагностирование: монография. СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023. 284 с.
14. Dr. Aung Ko Latt, Dr. Than Naing Win. Dynamic Force Analysis of Diesel Engine Crankshaft // Iconic Research and Engineering Journals. 2019. № 3 (2). P. 606–611. URL: <https://www.irejournals.com/paper-details/1701601> (дата обращения: 30.11.2025).
15. 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). P. 741–773. DOI: 10.14807/ijmp.v12i9.1554.
16. Суоров И.А. Законы робототехники Азимова: мировоззренческие основы и когнитивные искажения // Сибирский философский журнал. 2024. № 4. С. 5–24.
17. Устройство изменения скоростного режима дизеля при измерении дымности отработавших газов: пат. 226702 Рос. Федерация / Галайко В.В., Ложкин В.Н., Сацук И.В.; заявитель и патентообладатель Галайко В.В., Ложкин В.Н., Сацук И.В. – № 2024103760; заявл. 15.02.2024; опубл. 18.06.2024.
18. 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.
19. Сацук И.В. Теоретическая модель диагностирования силовых установок пожарных автомобилей по критериям конструктивной (пожарной) безопасности // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2024. Т. 32. № 1. С. 160–168. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2024.66.36.017.
20. Ложкин В.Н., Сацук И.В. Диагностирование дизельных пожарных автомобилей с использованием автоматизированного метода контроля их экологической безопасности в эксплуатации // Мир транспорта и технологических машин. 2025. № 4 (91). С. 52–58. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-4(91)-52-58. EDN SAJRXF.
21. Kalender S., Ergin S. Experimental Investigation into the Particulate Emissions from a Ferry Fuelled with Ultra-Low Sulfur Diesel // Journal of Marine Science and Technology. 2017. Vol. 25. P. 499–507. DOI: 10.6119/JMST-017-0418-2.
22. Impact of Oxygenated Additives on Soot Properties during Diesel Combustion / N. Palazzo [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14. № 1. P. 147–160. DOI: 10.3390/en14010147.

References

1. Galimova K.R. Ekologicheskaya bezopasnost' v ekspluatatsii pozharnoj i avarijno-spasatel'noj tekhniki // *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2024. № 108-10. S. 27–29. DOI: 10.18411/trnio-04-2024-530. EDN QQCEIE.
2. Obzor i analiz ispytatel'nogo oborudovaniya na baze odnocilindrovogo otseka dlya dovodki rabocheho processa dvigatelej vnutrennego sgoraniya / G.S. Kornilov [i dr.] // *Dvigatelistroenie*. 2025. № 3 (301). S. 3–13.
3. 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.
4. Sacuk I.V. Zakonomernosti raspredeleniya i tekhnicheskogo sostoyaniya ekspluatiruemyh pozharnykh avtomobilej po pokazatelyam konstruktivnoj bezopasnosti silovykh ustanovok // *Sibirskij pozharno-spasatel'nyj vestnik*. 2022. № 2 (25). S. 31–38.
5. Gavkalyuk B.V., Lozhkin V.N., Smirnov A.S. Teoriya i praktika obespecheniya bezopasnosti primeneniya v usloviyah chrezvychajnyh situacij silovykh ustanovok pozharnykh avtomobilej 4-5 pokolenij // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2023. № 2 (66). S. 8–15.
6. Ivanov K.S., Resnyanskij S.G., Moroz N.A. Vliyanie dinamicheskikh nagruzok na prochnost' detalej mashin i rezhimy dvizheniya pozharnykh avtomobilej // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2022. № 3. S. 75–80. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-3-75-80.
7. Lozhkina O.V., Mal'chikov K.B. Sravnitel'nyj analiz soderzhaniya pollyutantov v otrabotavshih gazah silovykh ustanovok malomernykh sudov i avtotransportnykh sredstv // *Dvigatelistroenie*. 2024. № 1 (295). S. 21–32.
8. Trofimenko Yu.V., Filippova R.V., Fen'kov I.A. Zarubezhnyj opyt vnedreniya elektrobusnogo transporta v megapolisah: perekhod na nizkouglerodnye transportnye sredstva // *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2025. № 2-1 (89). S. 87–92. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-2-1(89)-87-92.
9. Lozhkina O.V. Monitoring i prognozirovaniye opasnogo tekhnogennogo zagryazneniya atmosfery parnikovymi gazami transporta / pod obshch. red. B.V. Gavkalyuka. SPb.: Sankt-Peterburgskij universitet GPS MChS Rossii, 2023. 166 s.
10. Sovremennyye metody ispytanij transportnykh 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.
11. Osipov D.V. Metodika prognozirovaniya effektivnosti i pozharnoj bezopasnosti nejtralizatorov transportnykh sredstv: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2011. 162 s.
12. Boldin A.P., Sarbaev V.I., Chusova A.S. Vozmozhnosti ekspluatacionnogo diagnostirovaniya avtomobilej Mercedes-Benz Sprinter special'nogo naznacheniya dlya povysheniya effektivnosti processov i tekushchego remonta, osushchestvlyаемykh na avtotransportnom predpriyatii v kooperatsii s firmennymi STO // *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*. 2020. № 4 (63). S. 3–13.
13. Lozhkin V.N. Obespechenie pozharnoj bezopasnosti slozhnykh elektronno-upravlyaemykh termokataliticheskikh sistem: teoreticheskie osnovy, diagnostirovanie: monografiya. SPb.: Sankt-Peterburgskij universitet GPS MChS Rossii, 2023. 284 s.
14. Dr. Aung Ko Latt, Dr. Than Naing Win. Dynamic Force Analysis of Diesel Engine Crankshaft // *Iconic Research and Engineering Journals*. 2019. № 3 (2). P. 606–611. URL: <https://www.irejournals.com/paper-details/1701601> (data obrashcheniya: 30.11.2025).
15. 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). P. 741–773. DOI: 10.14807/ijmp.v12i9.1554.
16. Surov I.A. Zakony robototekhniki Azimova: mirovozzrencheskie osnovy i kognitivnye iskazheniya // *Sibirskij filosofskij zhurnal*. 2024. № 4. S. 5–24.

17. Ustrojstvo izmeneniya skorostnogo rezhima dizelya pri izmerenii dymnosti otrabotavshih gazov: pat. 226702 Ros. Federaciya / Galajko V.V., Lozhkin V.N., Sacuk I.V.; zayavitel' i patentoobladatel' Galajko V.V., Lozhkin V.N., Sacuk I.V. – № 2024103760; zayavl. 15.02.2024; opubl. 18.06.2024.

18. Gavkalyuk B.V., Lozhkin V.N. Diagnostika mobil'nyh sredstv pozharnej ohrany s pomoshch'yu robota-manipulyatora dinamicheskogo nagruzheniya dvigatelya // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 1 (73). S. 41–49. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-41-49.

19. Sacuk I.V. Teoreticheskaya model' diagnostirovaniya silovyh ustanovok pozharnyh avtomobilej po kriteriyam konstruktivnoj (pozharnej) bezopasnosti // Sibirskij pozharно-spasatel'nyj vestnik. 2024. T. 32. № 1. S. 160–168. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2024.66.36.017.

20. Lozhkin V.N., Sacuk I.V. Diagnostirovanie dizel'nyh pozharnyh avtomobilej s ispol'zovaniem avtomatizirovannogo metoda kontrolya ih ekologicheskoy bezopasnosti v ekspluatatsii // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2025. № 4 (91). S. 52–58. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-4(91)-52-58. EDN SAJXP.

21. Kalender S., Ergin S. Experimental Investigation into the Particulate Emissions from a Ferry Fuelled with Ultra-Low Sulfur Diesel // Journal of Marine Science and Technology. 2017. Vol. 25. P. 499–507. DOI: 10.6119/JMST-017-0418-2.

22. Impact of Oxygenated Additives on Soot Properties during Diesel Combustion / N. Palazzo [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14. № 1. P. 147–160. DOI: 10.3390/en14010147.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 05.11.2025; одобрена после рецензирования: 06.12.2025; принята к публикации: 08.12.2025

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 05.11.2025; approved after review: 06.12.2025; accepted for publication: 08.12.2025

Информация об авторах:

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, <https://orcid.org/0000-0001-6381-0519>, SPIN-код: 9496-2451

Сацук Иван Владимирович, старший преподаватель кафедры пожарной и аварийно-спасательной техники Сибирской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (662972, Красноярский край, г. Железногорск, ул. Северная, д. 1), e-mail: kviteren@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-9465-6278>, SPIN-код: 7978-4483

Information about the authors:

Lozhkin Vladimir N., professor of the department of fire and emergency rescue equipment and automotive facilities of 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, <https://orcid.org/0000-0001-6381-0519>, SPIN: 9496-2451

Satsuk Ivan V., senior lecturer at the department of fire and emergency rescue equipment at the Siberian fire and rescue academy of EMERCOM of Russia (662972, Krasnoyarsk Krai, Zheleznogorsk, Severnaya st., 1), e-mail: kviteren@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-9465-6278>, SPIN: 7978-4483