

Научная статья

УДК 629.3.032.6:628.9; DOI: 10.61260/2218-130X-2025-4-143-155

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

✉ Сацук Иван Владимирович.

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

✉ kviteren@gmail.com

Аннотация. Рассмотрена проблема обеспечения экологической и пожарной безопасности силовых установок пожарных автомобилей, оснащённых сложными системами нейтрализации отработавших газов. Цель исследования – разработка комплексного подхода к оценке и обеспечению безопасности силовых установок пожарных автомобилей на основе анализа реальных эксплуатационных режимов и адаптации методов диагностики. В исследовании использованы методы теоретического моделирования, натурного эксперимента и статистического анализа. Формализованы два критических режима эксплуатации: длительная работа на холостом ходу (R1) и работа со значительным уровнем форсирования при неподвижном пожарном автомобиле для привода насоса (R2). При прогнозировании тепловых режимов адаптирована одномерная нестационарная модель каталитического нейтрализатора. Результаты показали, что режим R2 создаёт экстремальную тепловую нагрузку на топливно-кatalитическую систему. Моделирование выявило, что при обогащении смеси температура керамического субстрата в осевой зоне каталитического нейтрализатора может достигать 950–980 °C, что ведёт к термическому разрушению. Экспериментально доказана недостаточность стандартных методов контроля: в режиме R2 зафиксированы критические превышения по выбросам поллютантов, углеводородов и температуре корпуса каталитического нейтрализатора (до 845 °C), не выявляемые на холостом ходу. Установлена прямая связь между использованием некачественного топлива (повышенное содержание серы, ароматических углеводородов, воды) и деградацией топливно-кatalитической системы, сопровождаемой ее перегревом. Научная новизна заключается в выявлении закономерной связи между нагрузочно-скоростными циклами пожарных автомобилей, тепловым состоянием топливно-кatalитических систем и риском возникновения пожара, а также получении информации о его исправности с помощью тестирования дизеля в режиме свободного ускорения. Практическая значимость состоит в рекомендациях для пожарных подразделений, включающих внедрение метода свободного ускорения для диагностирования пожарной и экологической безопасности топливных систем пожарных автомобилей с контролем температуры каталитического нейтрализатора; установке пороговых температурных значений для обеспечения пожаробезопасной работы каталитического нейтрализатора; ужесточении контроля качества топлива; корректировке регламентов технического обслуживания с учётом наработки в экстремальных режимах.

Ключевые слова: пожарные автомобили, силовая установка, экологическая безопасность, пожарная безопасность, каталитический нейтрализатор, эксплуатационный режим, диагностика, температурный режим, качество топлива, техническое обслуживание

Для цитирования: Сацук И.В. Комплексный подход к обеспечению экологической и пожарной безопасности силовых установок пожарных автомобилей // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2025. № 4. С. 143–155. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-4-143-155.

Scientific article

A COMPREHENSIVE APPROACH TO ENSURING ENVIRONMENTAL AND FIRE SAFETY OF FIRE TRUCK POWER UNITS

✉ Satsuk Ivan V.

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

✉ kviteren@gmail.com

Abstract. This article examines the environmental and fire safety aspects of fire engine powertrains equipped with sophisticated exhaust gas aftertreatment systems. The objective of this study is to develop a comprehensive approach to assessing and ensuring the safety of fire engine powertrains based on an analysis of actual operating conditions and the adaptation of diagnostic methods. The study utilizes theoretical modeling, a full-scale experiment, and statistical analysis. Two critical operating modes are formalized: prolonged idling (R1) and operation with a significant boost level with the fire engine stationary to drive the pump (R2). A one-dimensional non-stationary model of the catalytic converter is adapted to predict thermal conditions. The results demonstrate that the R2 mode creates an extreme thermal load on the fuel-catalytic system. Modeling reveals that when the mixture is enriched, the temperature of the ceramic substrate in the axial zone of the catalytic converter can reach 950–980 °C, leading to thermal failure. The inadequacy of standard control methods has been experimentally proven: in the R2 mode, critical excesses in pollutant and hydrocarbon emissions and the temperature of the catalytic converter housing (up to 845 °C) were recorded, undetectable at idle. A direct link was established between the use of low-quality fuel (increased content of sulfur, aromatic hydrocarbons, water) and the degradation of the fuel-catalytic system, accompanied by its overheating. Scientific novelty lies in the identification of a consistent relationship between the load-speed cycles of fire trucks, the thermal state of the fuel-catalytic systems and the risk of fire, as well as obtaining information on its serviceability by testing the diesel engine in free acceleration mode. The practical significance lies in recommendations for fire departments, including the implementation of the free acceleration method for diagnosing the fire and environmental safety of the fuel systems of fire trucks with monitoring the temperature of the catalytic converter; setting temperature thresholds to ensure fire-safe operation of the catalytic converter; tightening fuel quality control; adjusting maintenance schedules to account for operating time under extreme conditions.

Keywords: fire trucks, power unit, environmental safety, fire safety, catalytic converter, operating mode, diagnostics, thermal regime, fuel quality, maintenance

For citation: Satsuk I.V. A comprehensive approach to ensuring environmental and fire safety of fire truck power units // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2025. № 4. P. 143–155. DOI: 10.61260/2218-130X-2025-4-143-155.

Введение. Состояние проблемы

Современные пожарные автомобили (ПА) представляют собой сложные технические комплексы, эффективность и безопасность которых напрямую зависят от работоспособности их силовых установок. В условиях ужесточения экологических стандартов (Евро-5, Евро-6), описанных в работе [1], эти установки оснащаются высокотехнологичными системами нейтрализации отработавших газов (ОГ) – селективными каталитическими нейтрализаторами, сажевыми фильтрами и системами рециркуляции ОГ, как, например, на АЦ-6,0-40 (5557) с двигателем ЯМЗ-53623, схема которого отражена на рис. 1 [2].

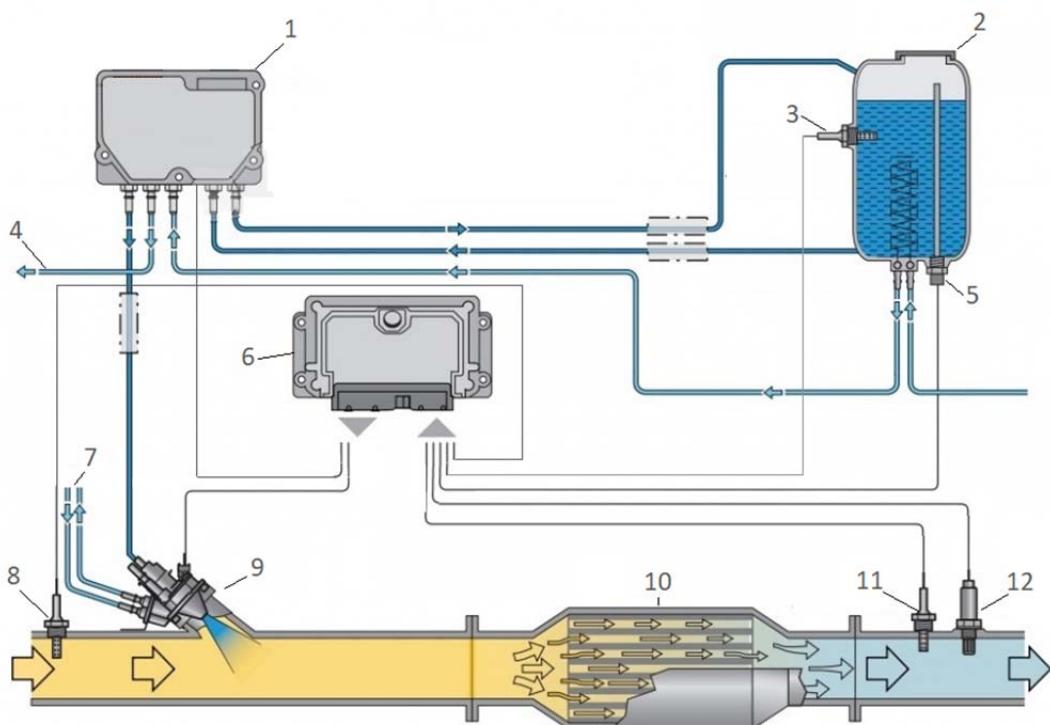


Рис. 1. Схема системы нейтрализации ОГ АЦ-6,0 40 (5557) [2]

1 – дозирующий модуль; 2 – бак с мочевиной; 3 – датчик температуры; 4, 7 – контур системы охлаждения для подогрева мочевины; 5 – датчик уровня; 6 – электронный блок управления двигателем EDC-7; 8 – терморезистивный датчик температуры; 10 – глушитель-нейтрализатор; 11 – керамический датчик дифференциального давления сажевого фильтра; 12 – датчик NO_x

В работе [3] отмечается, что специфические условия эксплуатации пожарной техники – частые резкие пуски, следование на пожар в форсированном режиме, длительная работа на холостом ходу и, что критически важно, работа двигателя под максимальной нагрузкой при нулевой скорости для привода пожарных насосов – формируют экстремальные тепловые и концентрационные режимы, нехарактерные для гражданского автотранспорта. Это, в соответствии с результатами исследований, описанных в работе [4], приводит к ускоренному износу деталей цилиндропоршневой группы, нарушению регулировок топливной аппаратуры и, как следствие, к росту дымности и токсичности ОГ. В работе [5] доказано, что проблема усугубляется тем, что неравномерность изменения технического состояния агрегатов и рост затрат на их поддержание в работоспособном состоянии требуют особого подхода к планированию технического обслуживания (ТО) и ремонта.

Анализ существующих исследований показывает, что, несмотря на широкое освещение в научной литературе проблематики экологической безопасности двигателей, существует значительный разрыв между исследованиями, справедливо сфокусированными на стационарные или стандартизованные нагрузочно-скоростные циклы для гражданского транспорта, и реальными для специальной техники, особенно ПА, значительно отличающимися от стационарных условиями эксплуатации. Например, убедительные работы в области безопасности топливно-кatalитических систем (ТКС) В.Н. Ложкина и Б.В. Гавкалюка [6] детально описывают кинетические модели процессов, протекающих в каталитических нейтрализаторах ПА, но преимущественно на стационарных режимах. Авторы справедливо указывают, что эффективность и безопасность ТКС критически зависят от поддержания стехиометрического состава смеси и температурного диапазона 200–800 °C. Однако применимость этих выводов к режиму работы ПА, когда двигатель после длительного простоя на холостом ходу (низкая температура ОГ) резко переходит в режим

максимальной нагрузки при нулевой скорости (пиковый тепловой поток без охлаждения), требует отдельной проверки. Нарушение этих условий, вызванное неисправностями топливной аппаратуры или низкокачественным топливом, например, при добавлении примесей, описанных в работе A.I. El-Seesy, Z. He, H. Kosaka [7], приводит не только к резкому росту выбросов токсичных веществ – оксида углерода (CO), углеводородов (CH), оксидов азота (NO_x) и твердых частиц (PM), но и к переходу системы в аварийный режим с риском возгорания. Исследования [8, 9] в области топливной экономичности и диагностики также подтверждают, что неравномерность подачи топлива и нестабильность работы двигателя являются ключевыми факторами, ухудшающими как экологические, так и мощностные показатели, но не предлагают методы, критерии и характеристики контроля работоспособности и экологичности двигателей ПА на ранее отмеченных критических нагрузочно-скоростных циклах их эксплуатации.

Особую опасность представляет локальный перегрев каталитического блока. При нештатных режимах, например, из-за обогащенной смеси или отказа форсунки, температура в нейтрализаторе может превысить 1 000–1 050 °C, что ведет к оплавлению керамических или металлических сот (рис. 2) и созданию противодавления в выпускном тракте [10]. Последующее повышение температуры может инициировать воспламенение горючих материалов в моторном отсеке. Для ПА, часто работающего в стационарном режиме «насос под давлением», когда естественное охлаждение набегающим потоком воздуха отсутствует, этот риск многократно возрастает, что подтверждается практикой эксплуатации.



Рис. 2. Визуализация последствий перегрева:

- а) оплавленный каталитический блок из-за отказа топливной аппаратуры;
 б) выгорание пластиковой защиты из-за неисправности каталитического блока
 (адаптировано из [10])

Анализ публикаций подтвердил, что есть ряд работ, посвященных моделированию сажеобразования в цилиндре, например, модель В.А. Лиханова, О.П. Лопатина и А.Н. Козлова [11] или модель Н. Omidvarborna и др. [12]. Модель В.А. Лиханова, О.П. Лопатина и А.Н. Козлова [11] позволяет оценить динамику образования дисперсного углерода, и, что особенно важно, ориентирована на расчет интегральных характеристик на выходе из цилиндра. Для прогноза теплового состояния каталитического нейтрализатора (КН) критически важна не только массовая концентрация сажи, но и её дисперсный состав, так как мелкие частицы с большой удельной поверхностью могут более активно окисляться на входе в КН, вызывая дополнительные экзотермические эффекты. Феноменологическая модель Н. Omidvarborna и др. [12], будучи полезной для понимания обобщенных закономерностей образования сажи, не учитывает влияние специфических, резко нестационарных режимов работы ПА, которые кардинально меняют температурный и концентрационный фон в выпускном тракте. С другой стороны, исследования характеристик твердых частиц,

например, работа Н. Sasaki и Т. Tsukamoto [13], выявили значительное влияние содержания серы в топливе на образование сажи и её дисперсный состав в ОГ судовых дизелей. Этот вывод напрямую указывает на необходимость строгого контроля качества дизельного топлива, так как повышенное содержание серы может привести к отравлению катализатора. Однако методология измерений, представленная в статье [13], ориентирована на лабораторные условия и не учитывает нестационарные режимы, характерные для эксплуатации ПА. Для оценки рисков в реальной эксплуатации требуется адаптация подходов к отбору проб и диагностике.

Важные выводы о связи состава топлива и сажеобразования сделаны в работе W. Park и др. [14], где показано, что ключевым фактором снижения образования сажи является содержание кислорода и длина углеродных цепей углеводородов топлива. Этот вывод свидетельствует о важности полноты сгорания для минимизации выбросов углеродистых частиц, которые могут накапливаться в порах КН и создавать локальные его перегревы. Однако математический аппарат гомогенного горения топлива в факеле, работа [14], в отличие от гетерогенного, не позволяет учесть принципиально важные для кинетики процесса нейтрализации поллютантов в КН физические явления «диффузионного торможения» реакций катализа, а также условия теплообмена у поверхности и в порах активного слоя катализатора. Более близкими к задаче моделирования тепловых режимов в условиях высоких нагрузок являются исследования М.Г. Шатрова и др. [15], посвященные влиянию сверхвысокого давления впрыска на процесс сгорания. Авторы отмечают, что повышение давления впрыска сокращает продолжительность активного тепловыделения. Для ПА это означает, что при переходе в режим работы насоса выброс тепла в выпускной тракт будет более интенсивным и концентрированным во времени, что не учитывается стандартными квазистационарными моделями КН.

Таким образом, возникает существенное противоречие между необходимостью применения сложных ТКС для соответствия экологическим стандартам и повышенной уязвимостью этих систем в специфических, сильно нестационарных условиях эксплуатации ПА, которые остаются слабо изученными. Стандартные методики диагностики технического состояния, описанные в Межгосударственном стандарте ГОСТ 33997-2016. Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки, ориентированные на контроль исправного/неисправного технического состояния двигателя в режиме свободного ускорения, не позволяют в реальных рабочих циклах применения ПА, особенно связанные с пожарной опасностью систем нейтрализации, оценить их критичное неработоспособное состояние. Современные методы диагностики должны включать не только химический анализ ОГ, но и спектральный мониторинг шума как индикатора механических неисправностей, как описано в работе [16], и применение систем удаленного контроля, описанных в работе [17].

Опыт эксплуатации карьерной техники с дизелями, проанализированный в работе [18], также демонстрирует, что поддержание исправного состояния топливной аппаратуры, включая устранение эксплуатационных ее разрегулировок из-за износа контактных сопряжений, является эффективным способом повышения ресурса КН и поддержания их в состоянии удовлетворения экологическим нормам. Данный положительный опыт требует его верификации с реальными нагрузочно-скоростными циклами ПА.

Следовательно, для решения проблемы обеспечения комплексной безопасности силовых установок ПА недостаточно простого переноса существующих методик и моделей. Требуется разработка нового подхода, основанного на глубоком анализе реальных эксплуатационных циклограмм, создании адекватной нестационарной модели теплового состояния ТКС, адаптации методов диагностики под выявленные критические режимы и установлении количественных критериев риска. Настоящее исследование направлено на восполнение этого научно-практического пробела.

Цель исследования: разработка комплексного подхода к оценке и обеспечению экологической и пожарной безопасности силовых установок ПА на основе анализа их реальных эксплуатационных режимов и адаптации методов диагностики.

Задачи исследования:

- формализация типовых эксплуатационных циклов силовых установок ПА и выделение критических, с точки зрения термической и концентрационной нагрузки, режимов;
- адаптация физико-математической модели теплового состояния каталитического нейтрализатора для условий сильно нестационарного потока ОГ;
- экспериментальное исследование влияния эксплуатационных факторов (качество горюче-смазочных материалов (ГСМ), режимы работы) на параметры выбросов, температурные поля элементов ТКС и состав твердых частиц в ОГ;
- оценка эффективности и разработка дополнений к стандартным методам инструментального контроля для диагностики предотказных (аварийных) состояний ТКС на ПА с использованием комплексного подхода на основе применения, термометрии, анализа состава ОГ, включая РМ, и спектрального анализа шума;
- разработка практических рекомендаций по оптимизации регламентов технического обслуживания для минимизации рисков.

Методы исследования

Исследование проводилось с использованием комплекса взаимодополняющих методов: теоретического моделирования, натурного эксперимента и статистического анализа. Такой комплексный подход соответствует современному уровню исследований двигателей и систем нейтрализации [19, 20].

Объектами исследования выступили силовые установки дизельных ПА АЦ 3,0-40 и АЦ 5,0-40 с наработкой 15–45 тыс. км, оснащённых системами нейтрализации ОГ уровня Евро-5. Эксперименты включали стационарные испытания на специализированном посту и натурные испытания с имитацией работы насосной установки под нагрузкой (давление 0,9 МПа) в течение 30 мин – режим, идентифицированный как критический (R2).

Для прогнозирования термических режимов КН в условиях нестационарной нагрузки была адаптирована одномерная нестационарная модель, основанная на классических принципах тепло- и массопереноса в гетерогенных системах. Модель описывает процессы тепло- и массопереноса в газовой фазе и твердом субстрате (керамической сите) с учётом экзотермических реакций окисления.

В основу модели легли классические принципы гетерогенного катализа:

- уравнение энергетического баланса для газового потока в канале:

$$\rho_g c_{pg} \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + v \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) = \frac{Nu \lambda_g}{d_h^2} (T_s - T_g),$$

где T_g , T_s – температура газа и субстрата; ρ_g , c_{pg} – плотность и теплоёмкость газа; v – скорость; Nu – критерий Нуссельта; λ_g – теплопроводность газа; d_h – гидравлический диаметр канала;

- уравнение энергетического баланса для твердого субстрата (керамического блока):

$$\frac{\rho_s c_{\{ps\}} \partial T_s}{\partial t} = \frac{\lambda_{\{s_{eff}\}}^2 \partial T_s}{\partial x^2} + \frac{Nu \lambda_g}{d_h^2} (T_g - T_s) + \sum (R_i \Delta H_i),$$

где $\lambda_{\{s_{eff}\}}$ – эффективная теплопроводность пористой структуры; R_i – скорость i -ой химической реакции; ΔH_i – тепловой эффект химической реакции.

Скорость химических реакций R_i окисления CO и CH рассчитывалась по кинетическому уравнению, учитывающему диффузионные ограничения в пористом слое катализатора:

$$R = \eta k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{R T_s}\right) C^n,$$

где η – коэффициент эффективности пористого слоя; k_0 – предэкспоненциальный множитель; E_a – энергия активации; C – концентрация реагента; n – степенной показатель.

Границные условия на входе в КН ($x = 0$) задавались как функции времени $T_{g(0,t)}$, $v(t)$, $C_{i(0,t)}$, полученные в ходе экспериментов на имитационном режиме работы насоса. Система уравнений решалась численно методом конечных разностей.

Измерения концентраций CO, CH, CO₂, O₂ проводились на режимах холостого хода (n_{min} , n_{pov}) в соответствии с ГОСТ 33997-2016 с помощью четырехкомпонентного газоанализатора АВГ-4. Измерение дымности для дизельных двигателей: дымность ОГ в режиме свободного ускорения определялась с помощью дымометра «МЕТА-01 МП 0.1».

Распределение температур по длине выпускного тракта (выпускной коллектор, входная/выходная часть КН, корпус КН) измерялось термопарами, подключенными к многоканальному регистратору АС-4. Считывание параметров в реальном времени и кодов неисправностей осуществлялось через диагностический разъем OBD-II сканером Autel MaxiCOM.

Анализ ГСМ осуществлялся отбором проб дизельного топлива из баков автомобилей. В аккредитованной лаборатории проводился анализ по ключевым показателям: содержание серы, фракционный состав, цетановое число. Для моторных масел определялось щелочное число, вязкость и содержание продуктов износа методом спектрального анализа. Состав и концентрация твердых частиц в ОГ оценивались с использованием адаптированной для полевых условий методики.

Полученные массивы экспериментальных данных обрабатывались методами математической статистики. Определялись средние значения (M), стандартное отклонение (σ), доверительные интервалы. Для установления корреляционных связей (например, между температурой КН и содержанием CO в ОГ) использовался коэффициент корреляции Пирсона. Адекватность разработанной модели проверялась путем сравнения расчетных и экспериментальных значений температур в характерных точках КН.

Результаты исследования и их обсуждение

На основе хронометража и данных бортовых систем была формализована типовая циклограмма работы силовой установки АЦ при выезде на происшествие и работе на месте (рис. 3). Анализ показал наличие двух принципиально критических с точки зрения безопасности ТКС режимов:

Режим 1 (R1): длительная работа на холостом ходу ($n \approx 800$ об/мин). Продолжительность до 40 мин при ожидании выезда или в ходе развертывания. Характеризуется низкой температурой ОГ на входе в КН (280–320 °C), что близко к нижней границе эффективности катализатора (точка активации ≈ 250 –300 °C). В этом режиме резко возрастает вероятность неполного сгорания и попадания несгоревших углеводородов (CH) на катализатор.

Режим 2 (R2): работа под нагрузкой при нулевой скорости. Двигатель работает на оборотах 2200–2600 об/мин для обеспечения номинального давления насоса. Продолжительность цикла – до 30 мин непрерывно. Данный режим характеризуется максимальным массовым расходом ОГ с высокой температурой (исходная 650–720 °C) и создает пиковую тепловую нагрузку на КН. При этом отсутствует охлаждающий эффект от набегающего потока воздуха, так как автомобиль неподвижен.

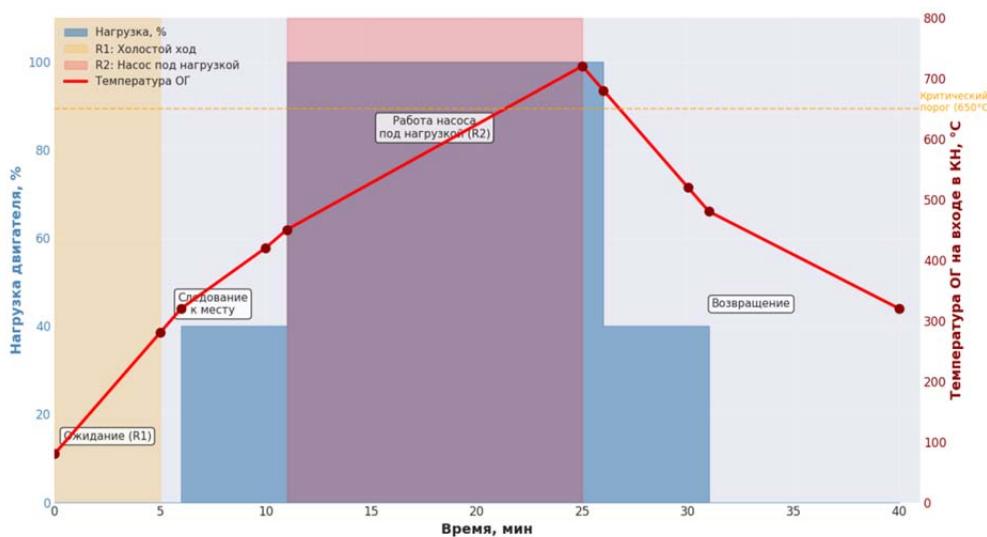


Рис. 3. Циклограмма нагрузки и температуры ОГ АЦ 5.0-40

Результаты моделирования теплового состояния КН с использованием адаптированной нестационарной модели показали следующее: в режиме R1 расчетная температура субстрата в средней части КН составляет 350–420 °C, что является достаточным для поддержания каталитической активности, но недостаточным для эффективного дожигания сажи (требуется > 550 °C). При резком переходе к режиму R2 наблюдается значительная температурная инерция. Температура газа на входе достигает 700 °C за 2–3 мин, в то время как температура субстрата в средней зоне КН выходит на квазистационарный уровень 780–820 °C лишь через 12–15 мин непрерывной работы. Это указывает на риск локальных перегревов в начальный период R2, что согласуется с наблюдениями интенсивного тепловыделения на высоких нагрузках [14].

Расчеты показали, что при наличии даже незначительного обогащения смеси ($\lambda=0,95$) на режиме R2 экзотермический вклад от окисления CO и CH может повысить температуру субстрата в осевой зоне КН до 950–980 °C, что превышает температурную стойкость керамических носителей (850 °C) и приближается к точке оплавления (1 000–1 050 °C для современных металлических носителей [2]). Этот вывод подтверждает и усиливает тезис работы [15] о важности состава смеси для теплового режима.

Результаты инструментального контроля двух пожарных автомобилей на режимах холостого хода и в имитационном режиме R2 обобщены в таблице.

Таблица

Результаты инструментального контроля силовых установок ПА

Объект (пробег, тыс. км)	Режим	CO, % (об.)	CH, ppm (об.)	λ	Температура корпуса КН, °C	Дымность, m^{-1}
АЦ-5.0-40 (15)	n_{min}	0,12	85	1,01	310	–
	n_{pov}	0,08	65	1	390	–
	R2	0,45*	220*	0,97*	715*	0,8*
АЦ 3.0-40 (45)	n_{min}	0,60	180	0,99	295	–
	n_{pov}	0,35	140	1,02	365	–
	R2	2,10**	950**	0,91**	845**	2,5**

Примечание: * – значения на пределе нормы; ** – значения, превышающие норму.

На режимах n_{min} и n_{pov} все автомобили формально соответствовали требованиям ГОСТ 33997–2016. Однако у автомобиля с большим пробегом (АЦ 3.0-40, 45 000 км) концентрации СО и СН на n_{min} были близки к предельным (0,5 % и 100 ppm соответственно), что косвенно указывало на снижение эффективности КН. При имитации работы под нагрузкой (R2) у этого же автомобиля были зафиксированы критические отклонения: значительный рост содержания СО (2,10 %) и СН (950 ppm), обогащение смеси ($\lambda=0.91$) и температура корпуса КН 845 °C. Это напрямую указывает на частичную потерю активности катализатора и работу системы в аварийном пожароопасном режиме, что не было выявлено при стандартной проверке на холостом ходу.

Температура корпуса КН в режиме R2 оказалась наиболее чувствительным индикатором. Превышение порога в 750 °C (для данных моделей) коррелировало с повышенными выбросами и обогащением смеси. Экспериментально зафиксированный рост температуры до 845 °C подтверждает прогноз модели о возможности перегрева в условиях длительной работы под нагрузкой. Данные по дымности, хотя и не являются критически высокими, также свидетельствуют об ухудшении качества сгорания и возможном увеличении потока сажи к сажевому фильтру (если он установлен), что создает дополнительную экзотермическую нагрузку при регенерации. Этот факт перекликается с выводами работы [15] о динамике сажеобразования, однако в рассматриваемом случае акцент смещен на последствия для термического состояния системы нейтрализации.

Лабораторный анализ ГСМ показал, что в 33 % случаев содержание серы в дизельном топливе превышало 10 мг/кг (до 18 мг/кг), что не соответствует классу 5 (Евро-5). Для автомобиля с наихудшими показателями (АЦ-3.0-40) также было обнаружено повышенное содержание углеводородов (32 %) и следы воды в топливе. Это подтверждает тезис о том, что качество ГСМ является ключевым эксплуатационным фактором, ускоряющим деградацию ТКС и провоцирующим риск перегрева [7]. Полученные результаты косвенно подтверждают выводы работы [5] о влиянии серы на эмиссионные характеристики, но расширяют их, демонстрируя прямую связь между некачественным топливом, деградацией катализатора и ростом температуры – ключевого фактора пожарного риска для ПА.

Заключение

Проведённое комплексное исследование позволило разработать и обосновать метод контроля экологической и пожарной безопасности силовых установок ПА, учитывающий их специфические условия эксплуатации.

Установлены и formalизованы критические режимы эксплуатации, создающие повышенную нагрузку на системы нейтрализации отработавших газов (ТКС). К ним относятся длительная работа на холостом ходу (R1), приводящая к низкотемпературному режиму и накоплению несгоревших углеводородов, и, что наиболее важно, режим работы двигателя под максимальной нагрузкой при нулевой скорости (R2) для привода насосной установки. Последний характеризуется экстремальным тепловыделением и отсутствием эффективного воздушного охлаждения, что является ключевым фактором пожарного риска.

Разработана и верифицирована математическая модель нестационарного теплового состояния КН, адаптированная для условий резко переменных расходов и температур ОГ. С помощью численного исследования по разработанной модели было показано, что при работе в режиме R2 с незначительным обогащением топливовоздушной смеси ($\lambda \approx 0,95$) температура керамического субстрата в осевой зоне КН может достигать 950–980 °C, что превышает предельно допустимые значения и ведёт к термическому разрушению.

Экспериментально доказана недостаточность регламентированных методов контроля (ГОСТ 33997–2016), проводимых исключительно на режимах холостого хода. Установлено, что автомобиль может формально соответствовать нормативам при стандартной проверке, но демонстрировать критические превышения по содержанию СО, СН и, главное, по температуре корпуса КН (до 845 °C) в режиме имитации реальной нагрузки (R2). Таким

образом, температура корпуса КН в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным, предложена в качестве ключевого диагностического параметра для выявления предотказного состояния.

Установлена прямая корреляция между качеством применяемых дизельных топлив и деградацией характеристик ТКС. Подтверждено, что содержание серы выше норм Евро-5, повышенное количество ароматических углеводородов и наличие воды в топливе являются ведущими факторами, ускоряющими отравление и блокировку катализатора, что в итоге приводит к перегреву и переходу системы в аварийный режим. Научная новизна работы заключается в следующем:

– впервые для парка ПА осуществлена количественная оценка взаимосвязи между типовыми эксплуатационными циклограммами, тепловым состоянием ТКС и проявлением пожарно-опасной ситуации;

– предложен и апробирован комплексный диагностический подход, объединяющий стандартный инструментальный контроль с нагрузочным тестированием и термометрией выпускного тракта;

– получены экспериментальные данные, конкретизирующие для условий эксплуатации спецтехники ранее выявленные общие закономерности деградации и отказов топливно-кatalитических систем.

Практическая значимость состоит в разработке конкретных рекомендаций для подразделений пожарной охраны:

– внедрение в программу периодического технического контроля ПА обязательной проверки в режиме, имитирующем работу насоса под нагрузкой (давление 0,8–1,0 МПа, время 15–20 мин), с одновременным контролем температуры корпуса катализатора;

– установка порогового значения температуры корпуса КН (не более 750–800 °С в зависимости от модели) как критерия необходимости углубленной диагностики и обслуживания топливной системы и ТКС;

– ужесточение входного контроля качества дизельного топлива, с обязательной проверкой на содержание серы и отсутствие воды;

– корректировка регламентов ТО с учетом наработки в наиболее нагруженных режимах (R2), а не только по календарному сроку или общему пробегу.

Список источников

1. Olabi A.G., Maizak D., Wilberforce T. Review of the regulations and techniques to eliminate toxic emissions from diesel engine cars // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 748. P. 141249. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141249.
2. 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.
3. Ложкин В.Н., Лакеев Д.А., Саратов Д.Н. Диагностирование топливных и экологических показателей двигателей пожарных автомобилей применительно к условиям эксплуатации // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2013. № 3. С. 44–51.
4. A comprehensive review on water-emulsified diesel fuel: chemistry, engine performance and exhaust emissions / A. Jhalani [et al.] // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 4570–4587. DOI: 10.1007/s11356-018-3958-y.
5. Гребенников А.С., Гребенников С.А., Косарева А.В. Неравномерность и цикличность изменения затрат на обеспечение работоспособности автомобиля // Вестник машиностроения. 2017. № 9. С. 3–11.
6. Гавкалюк Б.В., Ложкин В.Н. Повышение эффективности окислительного катализа нейтрализатора пожарной автоцистерны на режимах подачи воды/пены // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 2 (74). С. 130–138. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-130-138.

7. El-Seesy A. I., He Z., Kosaka H. Combustion and emission characteristics of a common rail diesel engine run with n-heptanol-methyl oleate mixtures // Energy. 2021. Vol. 214. P. 118972. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118972.
8. Девянина А.С. Оценка влияния неравномерности подачи топлива на показатели дизеля // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 5. С. 5–10.
9. Повышение эффективности технической эксплуатации автотранспортных средств по результатам исследования их эксплуатационных показателей / Е.В. Кондрашова [и др.] // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2015. № 4 (47). С. 80–86.
10. 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.
11. Лиханов В.А., Лопатин О.П., Козлов А.Н. Моделирование сажеобразования в цилиндре дизеля // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25. № 1. С. 47–59. DOI: 10.18721/JEST.25105.
12. Omidvarborna H., Kumar A., Kim D.-S. Recent Studies on Soot Modeling for Diesel Combustion // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 48. P. 635–647. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.019.
13. Сажеобразование в ДВС (по материалам конгресса CIMAC) // Двигателестроение. 2021. № 3 (285). С. 39–46.
14. The effect of oxygenated fuel properties on diesel spray combustion and soot formation / W. Park [et al.] // Combustion and Flame. 2016. Vol. 180. P. 276–283. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.02.026.
15. Влияние показателей топливоподачи на рабочий процесс дизеля при достижении давления впрыскивания 250 МПа / М.Г. Шатров [и др.] // Двигателестроение. 2023. № 4 (294). С. 42–55. DOI: 10.18698/јес.2023.4.42-55.
16. О гигиенической значимости спектрального содержания шума автомобилей / В.О. Красовский [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 2. С. 46.
17. Zorin V.A., Pegachkov A.A. Reliability and Risk Assessment of Machine Building Items According to Diagnostics Results // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49. № 9. P. 811–816. DOI: 10.3103/S1052618820090149.
18. Опыт обеспечения экологической безопасности эксплуатации карьерного оборудования с двигателями внутреннего сгорания / С.И. Протасов [и др.] // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 9. С. 66–70. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-9-66-70.
19. Гусаков С.В., Марков В.А., Ахмадниа М. Расчетные исследования автомобильного двигателя на режимах испытательных циклов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 1 (670). С. 57–64.
20. Огороднов С.М., Тихомиров А.Н., Малеев С.И. Оценка возможности использования аналитических методов при исследовании топливной экономичности автомобилей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2015. № 2 (659). С. 53–62.

References

1. Olabi A.G., Maizak D., Wilberforce T. Review of the regulations and techniques to eliminate toxic emissions from diesel engine cars // Science of the Total Environment. 2020. Vol. 748. P. 141249. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141249.
2. Sacuk I.V. Teoreticheskaya model' diagnostirovaniya silovyh ustavok pozharnykh avtomobilej po kriteriyam konstruktivnoj (pozharnoj) bezopasnosti // Sibirskij pozharno-spasatel'nyj vestnik. 2024. Т. 32. № 1. С. 160–168. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2024.66.36.017.
3. Lozhkin V.N., Lakeev D.A., Saratov D.N. Diagnostirovaniye toplivnyh i ekologicheskikh pokazatelej dvigatelej pozharnykh avtomobilej primenitel'no k usloviyam ekspluatacii // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2013. № 3. С. 44–51.

4. A comprehensive review on water-emulsified diesel fuel: chemistry, engine performance and exhaust emissions / A. Jhalani [et al.] // Environmental Science and Pollution Research. 2019. Vol. 26. P. 4570–4587. DOI: 10.1007/s11356-018-3958-y.
5. Grebennikov A.S., Grebennikov S.A., Kosareva A.V. Neravnomernost' i ciklichnost' izmeneniya zatrat na obespechenie rabotosposobnosti avtomobilya // Vestnik mashinostroeniya. 2017. № 9. S. 3–11.
6. Gavkalyuk B.V., Lozhkin V.N. Povyshenie effektivnosti okislitel'nogo kataliza nejtralizatora pozharnoj avtocisterny na rezhimah podachi vody/peny // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 2 (74). S. 130–138. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-130-138.
7. El-Seesy A. I., He Z., Kosaka H. Combustion and emission characteristics of a common rail diesel engine run with n-heptanol-methyl oleate mixtures // Energy. 2021. Vol. 214. P. 118972. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118972.
8. Devyanina A.S. Ocenka vliyaniya neravnomernosti podachi topliva na pokazateli dizelya // Traktory i sel'hozmashiny. 2017. № 5. S. 5–10.
9. Povyshenie effektivnosti tekhnicheskoy ekspluatacii avtotransportnyh sredstv po rezul'tatam issledovaniya ih ekspluatacionnyh pokazatelej / E.V. Kondrashova [i dr.] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2015. № 4 (47). S. 80–86.
10. Gavkalyuk B.V., Lozhkin V.N., Smirnov A.S. Teoriya i praktika obespecheniya bezopasnosti primeneniya v usloviyah chrezvychajnyh situacij silovyh ustavov pozharnyh avtomobilej 4–5 pokolenij // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 2 (66). S. 8–15.
11. Lihanov V.A., Lopatin O.P., Kozlov A.N. Modelirovaniye sazheobrazovaniya v cilindre dizelya // Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2019. T. 25. № 1. S. 47–59. DOI: 10.18721/JEST.25105.
12. Omidvarborna H., Kumar A., Kim D.-S. Recent Studies on Soot Modeling for Diesel Combustion // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 48. P. 635–647. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.019.
13. Sazheobrazovanie v DVS (po materialam kongressa CIMAC) // Dvigatelestroenie. 2021. № 3 (285). S. 39–46.
14. The effect of oxygenated fuel properties on diesel spray combustion and soot formation / W. Park [et al.] // Combustion and Flame. 2016. Vol. 180. P. 276–283. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.02.026.
15. Vliyanie pokazatelej toplivopodachi na rabochij process dizelya pri dostizhenii davleniya vpryskivaniya 250 MPa / M.G. Shatrov [i dr.] // Dvigatelestroenie. 2023. № 4 (294). S. 42–55. DOI: 10.18698/jec.2023.4.42-55.
16. O gigienicheskoy znachimosti spektral'nogo soderzhaniya shuma avtomobilej / V.O. Krasovskij [i dr.] // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2017. № 2. S. 46.
17. Zorin V.A., Pegachkov A.A. Reliability and Risk Assessment of Machine Building Items According to Diagnostics Results // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. Vol. 49. № 9. P. 811–816. DOI: 10.3103/S1052618820090149.
18. Opyt obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti ekspluatacii kar'ernogo oborudovaniya s dvigatelyami vnutrennego sgoraniya / S.I. Protasov [i dr.] // Bezopasnost' truda v promyshlennosti. 2017. № 9. S. 66–70. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-9-66-70.
19. Gusakov S.V., Markov V.A., Ahmadnia M. Raschetnye issledovaniya avtomobil'nogo dvigatelya na rezhimah ispytatel'nyh ciklov // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie. 2016. № 1 (670). S. 57–64.
20. Ogorodnov S.M., Tihomirov A.N., Maleev S.I. Ocenka vozmozhnosti ispol'zovaniya analiticheskikh metodov pri issledovanii toplivnoj ekonomichnosti avtomobilej // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie. 2015. № 2 (659). S. 53–62.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 08.11.2025; одобрена после рецензирования: 13.12.2025;
принята к публикации: 15.12.2025

Information about the article:

The article was submitted to the editorial office: 08.11.2025; approved after review: 13.12.2025;
accepted for publication: 15.12.2025

Информация об авторах:

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:

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