

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022. Т. 31. № 3. С. 65–74
POZHAROVZRYVBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2022; 31(3):65-74

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH PAPER

УДК 614.84+621.43.062

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74>

Теория и практика диагностики пожароопасных режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов

Владимир Николаевич Ложкин ✉

Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Массовое применение на автомобильных двигателях каталитических нейтрализаторов и сажевых фильтров обострило проблему их возгорания и актуализировало научно-методическое обеспечение экспертизы причин пожарно-аварийных режимов (ПАР) эксплуатации топливно-каталитических агрегатов (ТКА). Подтверждена связь ПАР работы ТКА с отказами топливной аппаратуры, износами цилиндропоршневой группы двигателей и отклонениями состава топлива. Целью являлась разработка метода диагностики пожароопасных режимов эксплуатации ТКА автотранспорта.

Методология. Обоснована модель окислительного катализа в ТКА. Она обеспечивает расчет термokatалитической эффективности и генерации тепла в активном слое платинового катализатора на $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в зависимости от температуры отработавших газов (ОГ), концентрации CO, CH и сажи. Установлено, что теоретически процесс катализа может развиваться в четырех предельных областях: внутренняя кинетическая область, внутридиффузионная область, внешнедиффузионная область, внешнекинетическая область.

Результаты и обсуждение. Экспериментально-расчетные исследования показали вероятность аварийных автомобилей с многократным превышением выброса сажи и термической напряженности. На двигателе КамАЗ 10-кратное увеличение в ОГ CO, CH и сажи увеличивает тепловую производительность каталитической реакции с 17 282 до 491 907 кДж/ч, создавая угрозу возгорания. Для идентификации ПАР предложен метод диагностики на основе режима «свободного ускорения» (СУ) по ГОСТ 33997–2016. Процедура дополнена максимальными оборотами и ограничением (0,5 с) времени режима СУ. Последнее необходимо для гарантированного выхода двигателя на «внешнюю скоростную характеристику». Метод применен в пожарно-технических исследованиях автомобиля Ford Mondeo с дизелем TDCi («Common Rail System») и каталитическим сажевым фильтром. Лабораторными экспертно-аналитическими исследованиями было установлено, что основной причиной работы ТКА в аварийных (по экологической и пожарной опасности) режимах является накапливаемая при длительной эксплуатации коррозия прецизионных деталей топливной аппаратуры. Прогрессирующая коррозия происходит по причине избыточного содержания в топливе и масле серы и влаги.

Выводы. Показано, что аварийный перегрев каталитического нейтрализатора приводит к резкому увеличению риска возгорания автомобиля. Предложен оригинальный метод диагностики пожароопасных режимов эксплуатации нейтрализаторов на основе процедур ГОСТ 33997–2016 (ТР ТС 018/2011).

Ключевые слова: автомобиль; двигатель; неисправность; отработавшие газы; пожарный риск; математическая модель; эксперимент; расчеты; метод диагностики

Автор выражает благодарность научному руководителю проектов Института безопасности дорожного движения при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», д-ру техн. наук, профессору Кравченко П.А. за предоставленную возможность проведения инструментального контроля эколого-пожароопасных режимов работы ТКА автомобилей в Центре технических экспертиз и полезные научно-методические консультации.

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

✉ Ложкин Владимир Николаевич, e-mail: vnlozhkin@yandex.ru

Theory and practice of diagnostics of fire hazardous modes of operation of catalytic converters

Vladimir N. Lozhkin ✉

Saint-Petersburg State Fire Service University of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters named after the Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The wide-scale use of catalytic converters and particulate filters in automobile engines has aggravated the problem of their ignition and updated the research and methodological framework for the examination of causes of fire emergency modes (FEMs) of operation of fuel catalytic units (FCUs). The relationship between the FEMs of the FCU operation and failures of the fuel equipment, wear of the cylinder-piston group of engines and deviations in fuel compositions was confirmed. The goal was to develop a diagnostic method for fire hazardous modes of operation of FCUs of vehicles.

Methodology. A model of oxidative catalysis underway in the FCU has been proven rational. The model is used to calculate the thermo-catalytic efficiency and heat generation in the active layer of the $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ platinum catalyst depending on the temperature of exhaust gases (EG), concentrations of CO, CH and soot. It has been found out that catalysis can theoretically develop in four limit domains: internal kinetic domain, internal diffusion domain, external diffusion domain, and external kinetic domain.

Results and discussion. Experimental and computational studies have shown the probability of emergence of breakdown vehicles with a multiple excess of soot emissions and thermal stresses. A 10-fold increase in CO, CH and soot in EG rises the thermal performance of the catalytic reaction from 17,282 to 491,907 kJ/h, creating a fire hazard in a KamAZ engine. To identify a FEM, the diagnostic method based on the "free acceleration" (FA) mode according to GOST 33997–2016 is proposed. The procedure is supplemented with maximum revolutions and restrictions (0.5 s) of the FA mode time. The latter is necessary for the guaranteed operation of the engine in the "full load mode". The method was applied in the course of the fire engineering studies on a Ford Mondeo car having a TDCi (Common Rail System) diesel engine and a catalytic particulate filter. Laboratory examination and analytical studies have found that the main reason for the operation of FCU in emergency (due to environmental and fire hazards) modes is the corrosion of precision parts of the fuel equipment accumulated during its long-term operation. Progressive corrosion is caused by excessive sulfur and moisture content in fuel and oil.

Conclusions. It's been proven that the emergency heating of a catalytic converter causes a sharp rise in the car combustion risk. The authors have proposed an original method for the diagnostics of fire-hazardous modes of operation of catalytic converters based on procedures set in GOST 33997–2016 (TP TC 018/2011).

Keywords: automobile; engine; malfunction; exhaust gases; fire risk; mathematical model; experiment; calculations; diagnostic method

The author would like to express his thanks to professor P.A. Kravchenko, Doctor of Engineering Sciences, a research advisor for projects of the Institute of Traffic Safety of the Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering" for an opportunity to perform the instrumentation control of the fire hazardous modes of operation of fuel catalyst units of automobiles at the Centre for Engineering Examination and helpful research and methodology-focused advice.

For citation: Lozhkin V.N. Theory and practice of diagnostics of fire hazardous modes of operation of catalytic converters. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2022; 31(3):65-74. DOI: 10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74 (rus).

✉ Vladimir Nikolaevich Lozhkin, e-mail: vnlozhkin@yandex.ru

Введение

Бурное развитие промышленности, транспорта и энергетики в течение новейшей истории усугубило глобальные и региональные угрозы стабильному развитию цивилизации, связанные с нарастающим изменением климата из-за парникового эффекта и опасным для здоровья людей загрязнением атмосферного воздуха поллютантами [1–4]. Реакция прогрессивного человечества на парирование новых смертоносных техногенных угроз была мгновенной [1]. Она инициировала мониторинговые и технологические исследования специфических явлений новой проблемы [1, 4–8], предложила оригинальные технические решения минимизации выброса парниковых газов, декарбонизации процессов получения потребительских мощностей, утилизации тепла для эксплуатируемых и новых, запускаемых в обращение объектов энергетики и транспорта [1, 3, 5, 8, 9].

Уже к 2018 году мировой и отечественный [10] рынки наполнились автомобилями¹, оснащенными ультрасовременными техническими системами «common rail system», «CRT system» (окислительный катализ с фильтрацией сажи), «SCR system» (селективный катализ NO_x) и так далее. Странами Европейского Союза освоен эколого-технологический уровень 6+ и на пороге 7-й уровень [1], способный конкурировать в использовании чистой энергии с электромобильным приводом. Однако усложнение конструкций стало проявляться в уменьшении их надежности и, как следствие, в отказах, приводящих к эколого-пожароопасным аварийным режимам эксплуатации ТКА.

Пожарная опасность ТКА связана с тем, что в электронно-управляемых их конструкциях появились источники мощного инфракрасного (тепло-

¹ Автомобильный рынок России 2018. Ежегодный справочник аналитического агентства «Автостат». М., 2018. 288 с. URL: <https://www.autostat.ru/research/product/274/> (дата обращения: 23.02.2022).

вого) излучения — пламегасители, системы термokatалитической нейтрализации отработавших газов, каталитически-регенерируемые сажевые фильтры и так далее [11–19], включая конструкции с принудительным электрическим разогревом матриц реактора от аккумулятора [15, 18, 19]. Участились случаи, когда при аварийных отказах систем автоматического регулирования состава топливно-воздушной смеси [16] и поддержания оптимальной температуры в реакторе [18, 19] неуправляемое тепловыделение в нем приводило к плавлению матриц [11] и возгоранию транспортного средства (рис. 1). Проблема резко усугубилась повсеместными в сети автосервиса РФ предложениями платных услуг блокировки системы контроля состава топливно-воздушной смеси по сигналам λ -зонда (тюнинговая услуга «прошивки» цифрового электронного блока контроля экологической безопасности). Процедура не согласована с фирмами-производителями автомобилей. Последняя проблема широко обсуждается специалистами на международных специализированных конференциях в РФ.

Все вышеотмеченное актуализировало тему работы, целью которой являлась разработка метода диагностики пожароопасных режимов эксплуатации каталитических нейтрализаторов, и поставило необходимость решения следующих основных задач:

- разработать феноменологическую модель кинетики процесса конверсии ОГ в каталитическом нейтрализаторе (КН) для изучения и понимания физико-химической природы обезвреживания ОГ и аварийного тепловыделения в КН;
- провести по модели, с использованием данных эксперимента на двигателе с КН, расчеты эффективности работы активного слоя, степени обезвреживания ОГ и подтвердить ими вероятность пожароопасного тепловыделения;
- на основе понимания кинетики физико-химического модельного процесса катализа разработать метод диагностирования эколого-пожароопасных режимов эксплуатации автомобилей;
- проведением экспертных исследований на аварийных автомобилях установить характерные для России причины отказов ТКА.

Методология

Из теории и практики организации рабочих процессов сгорания в поршневых двигателях [7, 9, 11, 16] логично заключить, что аварийный неуправляемый пожароопасный разогрев каталитических матриц обусловлен неконтролируемым увеличением в составе ОГ на выпуске из цилиндров двигателя продуктов неполного сгорания топлива, а именно: оксида углерода CO, суммарных углеводородов CH и сажи.



a



b

Рис. 1. Иллюстрация последствий реализации аварийного эколого-пожароопасного режима эксплуатации автомобильного ТКА: *a* — пожароопасный разогрев каталитического нейтрализатора при неисправности двигателя; *b* — оплавленные фрагменты керамических сотовых матриц

Fig. 1. An illustration of the consequences of the fire emergency mode of operation of catalytic converters in automobiles: *a* shows the fire-hazardous heating of a catalytic converter in case of the engine breakdown; *b* shows the fire-damaged fragments of cellular ceramic matrixes

Уместно отметить, что эти же вещества несут в себе угрозу для здоровья людей [1]. В работе [5] автором настоящей статьи для решения подобных задач были разработаны основы кинетического анализа предельных областей и характера протекания окислительного гетерогенного катализа в проточных каналах матриц сотовой конструкции в зависимости от температуры ОГ, концентрации в них горючих веществ, а также скоростей доставки к каталитической поверхности реактантов из «ядра» потока и отвода от нее продуктов реакций (скорости диффузии веществ). Стало понятным, что уровень температуры в зоне катализа, в условиях аварийного разогрева ТКА определяемый температурой остаточных газов в цилиндре двигателя или интенсивностью электрического разогрева матрицы носителя, в несоизмеримо большей мере способен оказать влияние на скорость химической

реакции (рост близкий к экспоненте), чем на скорость диффузии реагентов.

На рис. 2 в наглядной графической форме показаны вероятные, применительно ко всему спектру эксплуатационных режимов работы автомобильных ТКА [5] предельные области протекания кинетики процесса катализа в блочных нейтрализаторах ОГ сотовой конструкции: в безразмерных координатах a — $\lg W - T^{-1}$ зависимости Аррениуса (где W — характеристика скорости результирующего процесса, а T — температура в зоне протекания гетерогенной химической реакции катализа) и b — $C - l$ в условном качественном представлении графиков изменения концентрации реагентов в «ядре» потока ОГ и активном слое катализатора на $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ толщиной H (где C — концентрация реагентов, а l — удаленность, от поверхности носителя, слоя катализатора L , в котором протекает химическая реакция катализа с выделением тепла) [5, 9].

На основе не приводимых в статье по причине большого объема материала аналитических выкладок и результатов оценочных экспериментов и расчетов, которые в детальной полноценной форме изложены в работах [5, 9, 11] применительно к авторским конструкциям нейтрализаторов, далее приводятся резуль-

тирующие рабочие гипотезы, уравнения и феноменология описания характеристик пожароопасного аварийного физического явления, понимание которого позволило отработать инструментальный метод его диагностирования в ТКА.

Уравнение для оценки скорости результирующего процесса нейтрализации с учетом диффузионного торможения (где индекс m , в отличие от c , по смыслу подчеркивает это):

$$\left(\frac{dm}{dt}\right) = \frac{\frac{Nu_D \cdot D}{d_{\text{экв}}} \sqrt{D_{\text{эф}} \cdot k^1}}{\left(\frac{Nu_D \cdot D}{d_{\text{экв}}} + \sqrt{D_{\text{эф}} \cdot k^1}\right)} \cdot C_0, \quad (1)$$

где Nu_D — диффузионный критерий Нуссельта;

D — коэффициент, учитывающий диффузию реагентов в «ядре» потока ОГ;

$d_{\text{экв}}$ — характеристика «эквивалентного диаметра» канала матрицы;

$D_{\text{эф}}$ — условный показатель диффузии реагентов внутри пористого слоя катализатора толщиной H (рис. 2, b), физический смысл которого определяется соотношением:

$$dc/dt = D_{\text{эф}} \cdot \Delta c - W'(c), \quad (2)$$

где Δ — оператор Лапласа;

c — концентрация реагента в произвольном элементе пористого слоя катализатора;

$W'(c)$ — «эффективная скорость» химической реакции внутри слоя катализатора, определяемая по уравнению $W'(c) = k'c^n$;

k' — константа «псевдообъемной» гомогенной химической реакции внутри слоя [5];

$k' = k \cdot S_v$;

k — постоянная скорости «истинной» химической реакции по закону Аррениуса;

S_v — удельная капиллярная поверхность, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

n — порядок этой химической реакции в соответствии с зависимостью Аррениуса [11].

Эффективность работы активного слоя η в канале сотовой матрицы оценивалась степенью проникновения химической реакции катализа на глубину L капиллярного слоя $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ толщиной H (рис. 2, b) по уравнению [5]:

$$\eta = \frac{\int_{l=L}^{l=H} k' \cdot c(l) dl}{k' \cdot c_1} \cong th\Psi/\Psi, \quad (3)$$

где $th\Psi/\Psi$ — функция гиперболического тангенса модуля Тиле $\Psi = L\sqrt{k'/D_{\text{эф}}}$.

Интегрирование (3) осуществляется в границах (смотри рис. 2, b): $dc/dl = 0$ (при $l = H - L$); $C = C_1$ (при $l = H$). По физическому смыслу функция η показывает закономерность влияния «диффузионного

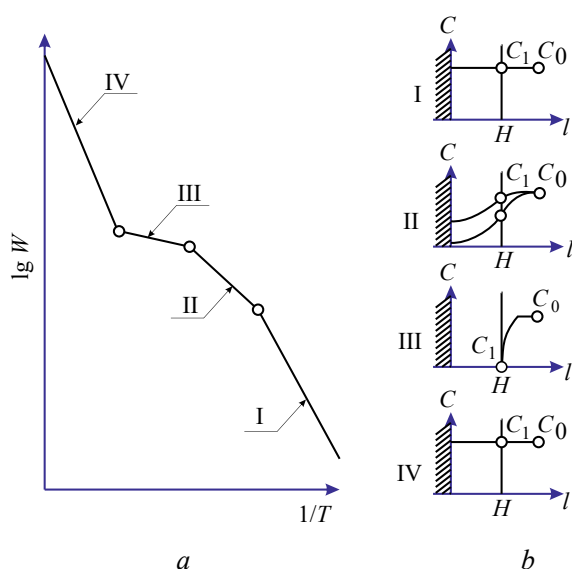


Рис. 2. Предельные области протекания процесса катализа ОГ в каналах блочного нейтрализатора [5]: C_0 , C_1 — безразмерные концентрации реагентов, соответственно, в «ядре» потока ОГ и на внешней поверхности слоя катализатора толщиной H ; I — внутренняя кинетическая область; II — внутренняя диффузионная область; III — внешняя диффузионная область; IV — внешняя кинетическая область

Fig. 2. The limit domains of the EG catalysis process in channels of the block catalyst [5]: C_0 , C_1 are dimensionless concentrations of reactants, respectively, in the “nucleus” of the EG flow and on the external surface of the catalyst layer that has thickness H ; I is the internal kinetic domain; II is the internal diffusion domain; III is the external diffusion domain; IV is the external kinetic domain

торможения» на скорость результирующего процесса (1) в порах катализатора на $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в зависимости от температуры. Положительной особенностью модели, с условной заменой гетерогенной реакции катализа на активной поверхности по зависимости «чистой кинетики» Аррениуса, псевдообъемной гомогенной реакции катализа в толще капиллярного слоя $H\text{-}L$ по уравнению (1) [5, 11] позволяло без труда производить оценку скорости результирующего процесса с учетом внутрипоровой кинетики (в извилистых капиллярных сосудах пор нерегулярной геометрии) по моделям Фольмера и Кнудсена [5]. По причине большого объема материалов моделирования данных феноменов [5] они присутствуют в обосновании кинетической теории возгорания КН данной статьи «по умолчанию».

Для уточнения области и характера кинетики развития аварийного режима разогрева ТКА в соответствии с методикой [5] были использованы результаты испытаний дизеля 8ЧН 12/12 (КАМАЗ) с КН оригинальной конструкции [11] в ОАО КАМАЗ на специализированном оборудовании, соответствующем требованиям сертификационных испытаний Правил № 49 Европейской Экономической Комиссии Организации Объединенных Наций (ЕЭК ООН) [11]. Расчетами по данным этих испытаний была установлена справедливость соотношений (4):

$$\frac{Nu_D D}{d_{\text{экв}}} \gg \sqrt{D_{\text{эф}} \cdot k'} \text{ и } H \gg L \gg \delta, \quad (4)$$

которая доказывает, согласно методологии [5], вероятность протекания процесса катализа, пограничного с аварийным разогревом ТКА, во внутренней диффузионной области (на рис. 2 это область II).

Оценка производства тепла реакциями катализа на режимах работы ТКА, пограничных с аварийным разогревом, производилась (смотри схему рис. 3) по соотношению, моделирующему связь температуры по глубине катализатора с измеренными концентрациями реагирующих веществ:

$$D_{\text{эф}} \frac{dc}{dl} \cdot \Delta H = \lambda \frac{dT}{dl}, \quad (5)$$

после интегрирования которого получаем:

$$\Delta T = T - T_1 = \frac{(-\Delta H) \cdot D_{\text{эф}}}{\lambda} (c_1 - c), \quad (6)$$

где T — значение текущей температуры реакции, К;
 ΔH — перепад энтальпии при реакции, кДж/моль;
 λ — коэффициент теплопроводности носителя на $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ Вт/(м·К);
 c_1 и T_1 — значения концентрации реагирующего вещества и температуры на условной

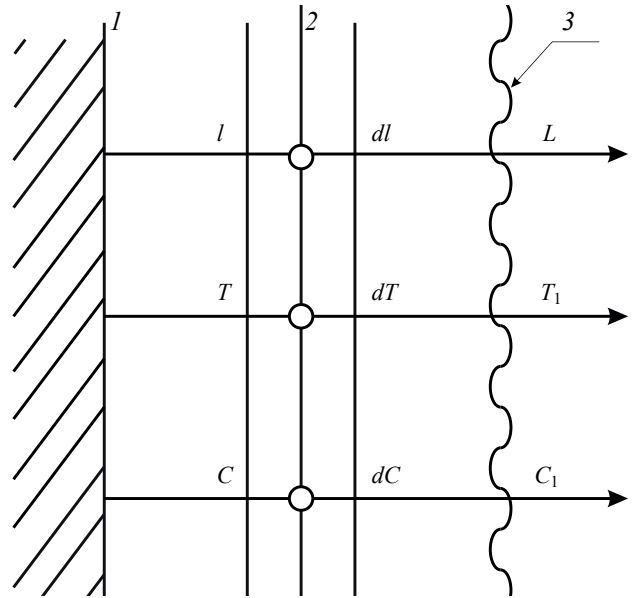


Рис. 3. Схема структуры активного слоя КН для расчета выделения в нем тепла: 1 — условная внешняя поверхность катализатора со стороны ядра потока ОГ; 2 — плоскость условного сечения в катализаторе на некотором расстоянии l от металлической (керамической) подложки носителя; 3 — поверхность металлической (керамической) подложки носителя

Fig. 3. The layout of an active layer of a catalytic converter needed to calculate heat emissions: 1 is the conventional external surface of the catalyst if viewed from the nucleus of the EG flow; 2 is the plane of a conventional section of a catalyst at some distance l from the metal (ceramic) support of the carrier; 3 is the surface of the metal (ceramic) support of the carrier

внешней поверхности катализатора со стороны ядра потока ОГ;

c — значение текущей концентрации реагентов, моль/м³ (рис. 3).

Производство тепла реакцией рассчитывалось, суммарно q_{Σ} , по измеряемым значениям концентраций СО, СН и сажи на входе и выходе из КН.

Результаты и обсуждение

Расчеты по разработанной модели и данным испытаний дизеля 8ЧН 12/12 (КАМАЗ) с КН на режимах Правил № 49 ЕЭК ООН (ТР ТС 018/2011) показали, что эффективность работы активного слоя катализатора изменяется в пределах значений $\eta = 20 \dots 95 \%$; меньшие значения отвечают полной (максимальной) нагрузке, большие значения — режиму холостого хода без внешней нагрузки. При этом производство тепла изменялось в диапазоне значений $q_{\Sigma} = 203 \dots 28\,167$ кДж; большие значения отвечают полной (максимальной) нагрузке, меньшие значения — режиму холостого хода без внешней нагрузки. Результаты соответствуют выбросам с ОГ горючих (токсичных) веществ исправного двигателя и ТКА. Ранее многочисленными автор-

скими² [2, 4, 10] и зарубежными [1, 6, 20] исследованиями было установлено, что на дорогах РФ и западных стран, порою, наблюдаются аварийные автомобили с 20–40-кратным превышением выброса с ОГ горючих (токсичных) веществ. Все это является свидетельством того, что кинетика предаварийной эколого пожароопасной работы ТКА начинает развиваться во внутридиффузионной области (нижний график II на рис. 2, б) с высокой вероятностью перехода процесса во внешнюю диффузионную область (III на рис. 2). При экстремальной (чрезвычайной) тепловой производительности КН аварийного автомобильного двигателя становится вероятной и внешняя кинетическая область (IV на рис. 2).

Адаптация разработанной авторской методологии к процессам проведения пожарно-технических экспертиз производилась для многих типов и моделей ТКА современного автотранспорта. Для выявления эколого пожароаварийных дизельных двигателей разработан метод с использованием диагностических критериев дымности ОГ на режимах максимальной частоты вращения коленчатого вала и свободного ускорения (СУ) с нагружением силами инерции собственных вращающихся и возвратно-поступательно двигающихся масс. Для гарантированного вывода нагрузки на «внешнюю скоростную характеристику» время воздействия на рычаг акселератора не должно превышать 0,5 с. Воспроизводимость идентификационного теста СУ по ГОСТ 33997–2016³ обеспечивается электромеханическим манипулятором. Процедура тестирования ТКА совмещается с контролем технического состояния автотранспорта на станциях диагностики ГИБДД с помощью измерителя непрозрачности ОГ MDO2 фирмы MAXA (рис. 4).

В таблице в качестве примера приведены результаты тестирования в режиме СУ на эколого пожароопасное состояние ТКА двигателя TDCi с «Common Rail System» аварийного автомобиля Ford Mondeo. Водитель обратился в Центр независимой экспертизы ИБДД СПбГАСУ после неудачных взаимодействий в дилерской компании.

Показания таблицы свидетельствуют о регистрации обильного дымления (сажеобразования) на тестовых режимах, значительно превышающих «пороговые» значения диагностических характеристик X_M . В условиях эксплуатации работу двигателя

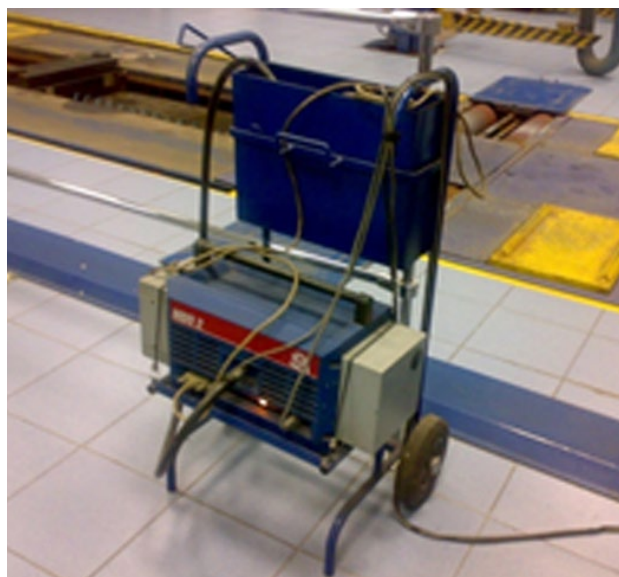


Рис. 4. Измеритель непрозрачности ОГ MDO2 фирмы MAXA
Fig. 4. MDO2 exhaust gas opacity meter made by MAXA

на таких режимах водитель наблюдал при быстрых разгонах автомобиля, а при включении регенерации от сажи ТКА водитель наблюдал разогрев сажевого фильтра до «малинового» цвета. Эти факты свидетельствуют, что разработанная процедура тестирования гарантирует выход двигателя на «внешнюю скоростную характеристику» и, следовательно, — «попадание» в теоретически требуемые для диагностики пожароопасной ЧС области II–III (рис. 2) экзотермического процесса катализа в керамических матрицах фильтра сажи.

Многолетний опыт проведения пожарно-технических экспертиз показывает, что аварийные режимы работы ТКА автомобильных двигателей могут наступить в разные периоды их эксплуатации, но с весьма характерными чертами отказов. Лабораторный анализ проб топлива, отобранных из топливного бака и корпуса фильтра тонкой очистки, ранее упомянутого аварийного автомобиля Ford Mondeo с дизельным двигателем TDCi, показал недопустимо высокое содержание в них механических примесей, влаги, углеводородов легких фракций, меркаптановой серы и сероводорода. Например, дефектация после разборки топливной системы другого пожароаварийного дизельного автомобиля HYUNDAI Santa Fe CLASSIC свидетельствовала о явно выраженных следах накопленного коррозионного разрушения поверхностей прецизионных деталей топливной аппаратуры по причине недоброкачественного топлива, обнаруженного в эколого пожароопасном автомобиле. На рис. 5 приведены фото элементов топливного насоса высокого давления (ТНВД) и форсунки со следами (свидетельствами) коррозионного разрушения. Авторскими пожарно-техническими

² Ложкин В.Н., Невмержицкий Н.В., Ложкина О.В. Расчетная методика и компьютерная программа для оценки и прогнозирования загрязнения воздуха на автомагистралях мелко-дисперсными взвешенными частицами PM10 и PM2.5 // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2 (55). С. 206–209.

³ ГОСТ 33997-2016. Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки: ИСС «КОДЕКС». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146241> (дата обращения: 23.02.2022 г.).

Результаты контроля автомобиля Ford Mondeo после регенерации фильтра сажи
Ford Mondeo testing results following the regeneration of the soot filter

Номер испытаний Test number	Показание X_M , м ⁻¹ Value X_M , м ⁻¹	Средняя величина X_M , м ⁻¹ (%) Average X_M , м ⁻¹ (%)	Пороговая величина, м ⁻¹ (%) Threshold value, м ⁻¹ (%)
Испытания на режимах максимальной частоты вращения коленчатого вала ($n_{\text{max x.x.}}$) Testing at maximum RPM ($n_{\text{max x.x.}}$)			
Обозначения диагностических характеристик по ГОСТ 33997–2016 [21] Symbols of diagnostic characteristics pursuant to GOST 33997–2016 [21]			
1	1,64	≈ 1,3 (40)	0,4 (15)
2	1,33		
3	1,15		
4	1,24		
Испытания на режимах свободного ускорения (СУ) Free acceleration testing			
1	5,90	≈ 4,0 (80)	1,6 (50)
2	4,29		
3	3,35		
4	3,48		
5	3,71		
6	3,33		

исследованиями установлено, что массовыми причинами наблюдаемых эколого пожароопасных режимов эксплуатации ТКА бензиновых и газобаллонных автомобилей являются: отравление и механическая блокировка активной поверхности ката-

лизатора, термическое разрушение керамических матриц, неисправности в электронно-цифровых системах регулирования состава топливовоздушной смеси по сигналам кислородного датчика, выход из строя λ -зонда.



a



b

Рис. 5. Свидетельства коррозионного разрушения элементов топливной аппаратуры аварийного автомобиля Ford Mondeo с двигателем TDCi: *a* — следы коррозионного разрушения на внутренних поверхностях корпуса форсунки; *b* — следы коррозионного разрушения на поверхностях корпуса гильзы ТНВД и всасывающего клапана

Fig. 5. The evidence of corrosive failure of elements of fuel injection equipment in a breakdown Ford Mondeo with a TDCi engine: *a* are traces of corrosive failure on the inner surfaces of the injector; *b* are traces of corrosive failure on the surfaces of the cartridge case of the high-pressure fuel pump and the suction valve

Выводы

Аварийное техническое состояние топливно-каталитических агрегатов (ТКА) современных автомобилей в эксплуатации представляет двойную чрезвычайную опасность для населения: высокий риск возгорания транспортного средства и обильный выброс с его отработавшими газами парниковых газов и сильнейших токсичных веществ. Автором разработан на основе изучения и понимания кинетики процесса катализа в матри-

цах блочной конструкции безразборный метод диагностирования эколого-пожароопасных режимов эксплуатации ТКА по составу ОГ, который позволяет надежно идентифицировать неисправные транспортные средства. Внедрение разработанного метода в систему организации пожарно-технических экспертиз МЧС России позволяет своевременно обнаружить и вывести из обращения на дорогах РФ транспортные средства с аварийными ТКА и тем самым снизить риски ЧС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Al-Delaimy W., Ramanathan V., Sorondo M.* Health of people, health of planet and our responsibility: Climate change, air pollution and health. Springer, 2020. 417 p. DOI: 10.1007/978-3-030-31125-4
2. *Lozhkin V., Lozhkina O., Dobromirov V.* A study of air pollution by exhaust gases from cars in well court-yards of Saint Petersburg // *Transportation Research Procedia*. 2018. Vol. 36. Pp. 453–458. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.124
3. *Alegbeleye O.O., Opeolu B.O., Jackson V.A.* Polycyclic aromatic hydrocarbons: A critical review of environmental occurrence and bioremediation // *Environmental Management*. 2017. Vol. 60. Issue 4. Pp. 758–783. DOI: 10.1007/s00267-017-0896-2
4. *Lozhkina O.V., Lozhkin V.N.* Estimation of nitrogen oxides emissions from petrol and diesel passenger cars by means of on-board monitoring: Effect of vehicle speed, vehicle technology, engine type on emission rates // *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2016. Vol. 47. Pp. 251–264. DOI: 10.1016/j.trd.2016.06.008
5. *Ложкин В.Н.* Теория и практика безразборной диагностики и каталитической нейтрализации отработавших газов дизелей : дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1995. 444 с.
6. *Shancita I., Masjuki H., Kalam M., Fattah I.R., Rashed M., Rashedul H.* A review on idling reduction strategies to improve fuel economy and reduce exhaust emissions of transport vehicles // *Energy Conversion and Management*. 2014. Vol. 88. Pp. 794–807. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.09.036
7. *Baturin S.A., Lozhkin V.N., Keiser E.* Experimentelle Flammen temperaturbestimmung in Zylinder schnell-drehender Dieselmotoren // *Kraftfahrzeuingtechnik*. 1979. Vol. 2. S. 44–46.
8. *Kaiser E.W., Siegl W.O., Trinker F.H., Cotton D.F., Cheng W.K., Drobot K.* Effect of engine operating parameters on hydrocarbon oxidation in the exhaust port and runner of a spark-ignited engine // *SAE Technical Paper Series*. 1995. DOI: 10.4271/950159
9. *Gao J., Tian G., Sornioti A.* On the emission reduction through the application of an electrically heated catalyst to a diesel vehicle // *Energy Science and Engineering*. 2019. Vol. 7. Issue 6. Pp. 2383–2397. DOI: 10.1002/ese3.416
10. *Ложкина О.В., Онищенко И.А.* Методика оценки выбросов опасных компонентов отработавших газов при пуске и прогреве двигателей автотранспортных средств в климатических условиях Арктики // *Вестник Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России*. 2020. № 3. С. 30–37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44108901>
11. *Costagliola M.A., Prati V., Mariani A., Unich A., Morrone B.* Gaseous and particulate exhaust emissions of hybrid and conventional cars over legislative and real driving cycles // *Energy and Power Engineering*. 2015. Vol. 07. Issue. 05. Pp. 181–192. DOI: 10.4236/epe.2015.75018
12. *Gänzler A.M., Casapu M., Doronkin D.E., Maurer F., Lott P., Glatzel P. et al.* Unravelling the different reaction pathways for low temperature CO oxidation on Pt/CeO₂ and Pt/Al₂O₃ by spatially resolved structure–activity correlations // *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2019. Vol. 10. Issue 24. Pp. 7698–7705. DOI: 10.1021/acs.jpclett.9b02768
13. *Gao J., Tian G., Sornioti A.* Review of thermal management of catalytic converters to decrease engine emissions during cold start and warm up // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 147. Pp. 177–187. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.037
14. *Leman A.M., Jajuli A., Feriyanto D., Rahman F., Zakaria S.* Advanced catalytic converter in gasoline engine emission control: A review // *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 87. P. 02020. DOI: 10.1051/mateconf/20178702020
15. *Khan S.R., Zeeshan M., Iqbal S.* Thermal management of newly developed non-noble metal-based catalytic converter to reduce cold start emissions of small internal combustion engine // *Chemical Engineering Communications*. 2018. Vol. 205. Issue 5. Pp. 680–688. DOI: 10.1080/00986445.2017.1412311
16. *Getsoian A.B., Theis J.R., Lambert C.K.* Sensitivity of three-way catalyst light-off temperature to air-fuel ratio // *Emission Control Science and*

- Technology. 2018. Vol. 4. Issue 3. Pp. 136–142. DOI: 10.1007/s40825-018-0089-3
17. Kannepalli S., Gremminger A., Tischer S., Deutschmann O. Optimization of axial catalyst loading in transient-operated zone-structured monoliths: Reduction of cumulative emissions in automotive oxidation catalysts // *Chemical Engineering Science*. 2017. Vol. 174. Pp. 189–202. DOI: 10.1016/j.ces.2017.09.013
 18. Gao J., Tian G., Sornioti A. On the emission reduction through the application of an electrically heated catalyst to a diesel vehicle // *Energy Science & Engineering*. 2019. Vol. 7. Issue 6. Pp. 2383–2397. DOI: 10.1002/ese3.416
 19. Ning J., Yan F. Temperature control of electrically heated catalyst for cold-start // *Emission Improvement. IFAC-PapersOnLine*. 2016. Vol. 49. Issue 11. Pp. 14–19. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.08.003
 20. Tsinoglou D.N., Weilenmann M. A simplified three-way catalyst model for transient hot-mode driving cycles // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2009. Vol. 48. Issue 4. Pp. 1772–1785. DOI: 10.1021/IE8010325

REFERENCES

1. Al-Delaimy W., Ramanathan V., Sorondo M. *Health of people, health of planet and our responsibility: Climate change, air pollution and health*. Springer, 2020; 417. DOI: 10.1007/978-3-030-31125-4
2. Lozhkin V., Lozhkina O., Dobromirov V. A study of air pollution by exhaust gases from cars in well courtyards of Saint Petersburg. *Transportation Research Procedia*. 2018; 36:453-458. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.124
3. Alegbeleye O.O., Opeolu B.O., Jackson V.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons: A critical review of environmental occurrence and bioremediation. *Environmental Management*. 2017; 60(4):758-783. DOI: 10.1007/s00267-017-0896-2
4. Lozhkina O.V., Lozhkin V.N. Estimation of nitrogen oxides emissions from petrol and diesel passenger cars by means of on-board monitoring: effect of vehicle speed, vehicle technology, engine type on emission rates. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 2016; 47:251-264. DOI: 10.1016/j.trd.2016.06.008
5. Lozhkin V.N. *Theory and practice of in-place diagnostics and catalytic neutralization of diesel exhaust gases : dissertation of the Doctor of Technical Sciences*. Saint Petersburg, 1995; 444. (rus).
6. Shancita I., Masjuki H., Kalam M., Fattah I.R., Rashed M., Rashedul H. A review on idling reduction strategies to improve fuel economy and reduce exhaust emissions of transport vehicles. *Energy Conversion and Management*. 2014; 88:794-807. DOI: 10.1016/j.enconman.2014.09.036
7. Baturin S.A., Lozhkin V.N., Keiser E. Experimentelle Flammen temperaturbestimmung in Zylinder schnell-drehender Dieselmotoren. *Kraftfahrzeig-technik*. 1979; 2:44-46. (ger).
8. Kaiser E.W., Siegl W.O., Trinker F.H., Cotton D.F., Cheng W.K., Drobot K. Effect of engine operating parameters on hydrocarbon oxidation in the exhaust port and runner of a spark-ignited engine. *SAE Technical Paper Series*. 1995. DOI: 10.4271/950159
9. Gao J., Tian G., Sornioti A. On the emission reduction through the application of an electrically heated catalyst to a diesel vehicle. *Energy Science and Engineering*. 2019; 7(6):2383-2397. DOI: 10.1002/ese3.416
10. Lozhkina O.V., Onishchenko I.A. Methodology for assessing emissions of hazardous components of exhaust gases during the start-up and warm-up of motor vehicle engines in the climatic conditions of the Arctic. *Bulletin of St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2020; 3:30-37. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44108901> (rus).
11. Costagliola M.A., Prati V., Mariani A., Unich A., Morrone B. Gaseous and particulate exhaust emissions of hybrid and conventional cars over legislative and real driving cycles. *Energy and Power Engineering*. 2015; 7(5):181-192. DOI: 10.4236/epe.2015.75018
12. Gänzler A.M., Casapu M., Doronkin D.E., Maurer F., Lott P., Glatzel P. et al. Unravelling the different reaction pathways for low temperature co oxidation on Pt/CeO₂ and Pt/Al₂O₃ by spatially resolved structure–activity correlations. *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 2019; 10(24):7698-7705. DOI: 10.1021/acs.jpclett.9b02768
13. Gao J., Tian G., Sornioti A. Review of thermal management of catalytic converters to decrease engine emissions during cold start and warm up. *Applied Thermal Engineering*. 2019; 147:177-187. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.10.037
14. Leman A.M., Jajuli A., Feriyanto D., Rahman F., Zakaria S. Advanced catalytic converter in gasoline engine emission control: A review. *MATEC Web of Conferences*. 2017; 87:02020. DOI: 10.1051/mateconf/20178702020
15. Khan S.R., Zeeshan M., Iqbal S. Thermal management of newly developed non-noble metal-based catalytic converter to reduce cold start emissions of small internal combustion engine. *Chemical Engineering Communications*. 2018; 205(5):680-688. DOI: 10.1080/00986445.2017.1412311
16. Getsioan A.B., Theis J.R., Lambert C.K. Sensitivity of three-way catalyst light-off temperature to air-fuel ratio. *Emission Control Science and Tech-*

- nology*. 2018; 4(3):136-142. DOI: 10.1007/s40825-018-0089-3
17. Kannepalli S., Gremminger A., Tischler S., Deutschmann O. Optimization of axial catalyst loading in transient-operated zone-structured monoliths: Reduction of cumulative emissions in automotive oxidation catalysts. *Chemical Engineering Science*. 2017; 174:189-202. DOI: 10.1016/j.ces.2017.09.013
 18. Gao J., Tian G., Sornioti A. On the emission reduction through the application of an electrically heated catalyst to a diesel vehicle. *Energy Science & Engineering*. 2019; 7(6):2383-2397. DOI: 10.1002/ese3.416
 19. Ning J., Yan F. Temperature control of electrically heated catalyst for cold-start. *Emission Improvement. IFAC-PapersOnLine*. 2016; 49(11):14-19. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.08.003
 20. Tsinoglou D.N., Weilenmann M. A simplified three-way catalyst model for transient hot-mode driving cycles. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009; 48(4):1772-1785. DOI: 10.1021/IE801032

Поступила 25.02.2022, после доработки 04.04.2022;
принята к публикации 16.05.2022

Received February 25, 2022; Received in revised form April 4, 2022;
Accepted May 16, 2022

Информация об авторе

ЛОЖКИН Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства; Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 369765; Scopus Author ID: 56566370300; ORCID: 0000-0001-6381-0519; e-mail: vnlojkin@yandex.ru

Information about the author

Vladimir N. LOZHKIN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Professor of Department of Rescue Equipment and Fire Vehicles, Saint Petersburg State Fire Service University of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters named after the Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 369765; Scopus Author ID: 56566370300; ORCID: 0000-0001-6381-0519; e-mail: vnlojkin@yandex.ru