
ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья

УДК 614.841; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-107-122

АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ДАННЫХ ПО ПОЖАРАМ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, ОБУСЛОВЛЕННЫМ ПОЖАРООПАСНЫМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ ТЕРМОКАТАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Дейнека Евгений Григорьевич.

Главное управление МЧС России по Ленинградской области, Ленинградская обл., Россия.

✉ Ложкина Ольга Владимировна.

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

✉ oljkina@yandex.ru

Аннотация. Представлен критический анализ и обобщение статистических данных и результатов исследований по пожарам автотранспортных средств, вызванных пожароопасной эксплуатацией термokatалитических систем, а также методов исследования и диагностирования аварийных пожароопасных режимов их работы. Установлено, что перегрев термokatалитических систем (до 1 000 °С и более) приводит к увеличению риска возникновения пожара. Перегрев связан, главным образом, с некорректной работой электронной системы управления впрыском топлива, пропуском и задержкой зажигания, подачей в цилиндры двигателя избыточного количества топлива, использованием некачественного топлива. Рассмотрена оригинальная методика диагностирования пожароопасных режимов работы термokatалитических систем, основанная на выявлении закономерностей между изменениями содержания вредных веществ в отработавших газах и неисправностями топливной аппаратуры, влияющими на качество приготовления горючей смеси, полноту ее сгорания и нейтрализацию вредных веществ.

Ключевые слова: пожары автотранспортных средств, каталитический нейтрализатор, дизельный сажевый фильтр, аварийный пожароопасный режим работы

Для цитирования: Дейнека Е.Г., Ложкина О.В. Анализ и обобщение статистических и исследовательских данных по пожарам автотранспортных средств, обусловленным пожароопасным режимом работы термokatалитических систем // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 3 (71). С. 107–122. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-107-122.

Scientific article

ANALYSIS AND REVIEW OF STATISTICAL DATA AND RESEARCH RESULTS ON FIRES IN MOTOR VEHICLES CAUSED BY FIRE HAZARDOUS EXPLOITATION OF THERMOCATALYTIC SYSTEMS

Deyneka Evgeniy G.

Main directorate of EMERCOM of Russia in the Leningrad region, Leningrad region, Russia.

✉ Lozhkina Olga V.

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

✉ oljkina@yandex.ru

Abstract. The paper presents a critical analysis and review of statistical and research data on vehicle fires caused by overheated thermocatalytic systems, and the analysis of methods for investigation and diagnosis of fire hazardous modes of thermocatalytic systems exploitation.

It was established that overheating of thermocatalytic systems (up to 1 000 °C or more) leads to an increase in the fire risk. The overheating is mainly associated with the incorrect operation of the electronic fuel injection system, the passage and delayed ignition, the supply of excess fuel to the engine cylinders, and the use of poor -quality fuels. The original methodology for diagnosing fire hazardous modes of thermocatalytic systems revealing relationships between changes in exhaust pollutants quantity and failures of fuel equipment affecting the quality of the fuel-air mixture formation, the fullness of fuel combustion and conversion of harmful substances is also described.

Keywords: vehicle fires, catalytic converter, diesel particulate filter, fire hazardous exploitation

For citation: Deyneka E.G., Lozhkina O.V. Analysis and review of statistical data and research results on fires in motor vehicles caused by fire hazardous exploitation of thermocatalytic systems // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 3 (71). P. 107–122. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-3-107-122.

Введение

В Российской Федерации и во многих странах мира происходит ежегодное увеличение числа автотранспортных средств (АТС). По сведениям информационного агентства «Автостат» (www.autostat.ru), в нашей стране с 2013 по 2023 г. количество АТС увеличилось в сегменте легковых автомобилей с 36,9 до 45,39 млн ед., в сегменте коммерческого легкого и грузового транспорта – с 7,42 до 7,94 млн ед., в сегменте автобусов – с 0,39 до 0,41 млн ед. В целом с 44,71 до 53,74 млн ед. прирост составил 20,2 %. Несмотря на активное продвижение на рынке электромобилей и гибридных автомобилей (по состоянию на 2023 г. было зарегистрировано 222 630 АТС с гибридной силовой установкой и 43 004 АТС с электрическим двигателем), автомобили, оснащенные двигателями внутреннего сгорания, в среднесрочной перспективе будут доминировать.

Анализ статистических данных и результаты собственных исследований [1–4] свидетельствуют о том, что в России активно эксплуатируются автомобили 3, 4, 5 экологических классов. Все они оборудованы каталитическими нейтрализаторами отработавших газов (ОГ) для минимизации вредного воздействия на качество атмосферного воздуха. На высокоразвитой поверхности каталитического нейтрализатора происходит высокотемпературное окисление угарного газа и углеводородов до углекислого газа и воды и восстановление оксидов азота до азота. При штатном режиме работы каталитический нейтрализатор разогревается до температур 400–800 °C, и при такой температуре достигается максимальная нейтрализация поллютантов [5–7], однако при аварийных режимах может происходить перегрев катализатора до 1 000–1 250 °C. К перегреву катализатора может приводить некорректная работа топливной системы (в том числе из-за неправильной работы системы электронного управления подачи топлива), неисправность и высокая изношенность топливной аппаратуры, использование некачественного топлива, частичное отравление и разрушение катализатора [8, 9].

Перегрев каталитических нейтрализаторов ОГ является одной из причин возникновения пожароопасных процессов: возгорания горючих материалов, случайно застрявших в конструктивных элементах днища автомобиля (сухой травы, листьев, обрывков полиэтилена, бумаги и пр. мусора) и последующего возгорания самого автомобиля; возгорания природных горючих материалов (например, сухой травы) и последующего развития природного пожара [10–13].

Целью настоящей работы явились анализ и обобщение статистических данных и результатов исследований по пожарам АТС, обусловленным пожароопасным режимом работы системы выпуска ОГ, а также методов исследования и диагностирования аварийных пожароопасных режимов работы термокаталитических систем (ТКС).

Аналитическая часть

Обзор современных каталитических нейтрализаторов ОГ двигателей автомобилей

Все современные автомобили, оборудованные двигателями внутреннего сгорания, оснащаются ТКС ОГ. Современные технологии термокатализической нейтрализации позволяют достигать высокой эффективности (90–99 %) превращения токсичных CO, CH и NO_x в нетоксичные CO₂, H₂O и N₂ [14, 15]. Для соответствия строгим нормативам Евро 5 и Евро 6 большинство современных автомобилей с бензиновыми двигателями оснащаются двумя последовательно соединенными трехкомпонентными катализаторами (ТКК), в которых происходит одновременная нейтрализация CO, CH и NO_x (рис. 1 а), а с дизельными двигателями – дизельным окислительным катализатором (ДОК) для нейтрализации CO и CH, дизельным сажевым фильтром (ДСФ) для дожигания сажи и селективным восстановительным катализатором (СВК или англ. SRC – selective reductive catalysis) для нейтрализации NO_x (рис. 1 б).

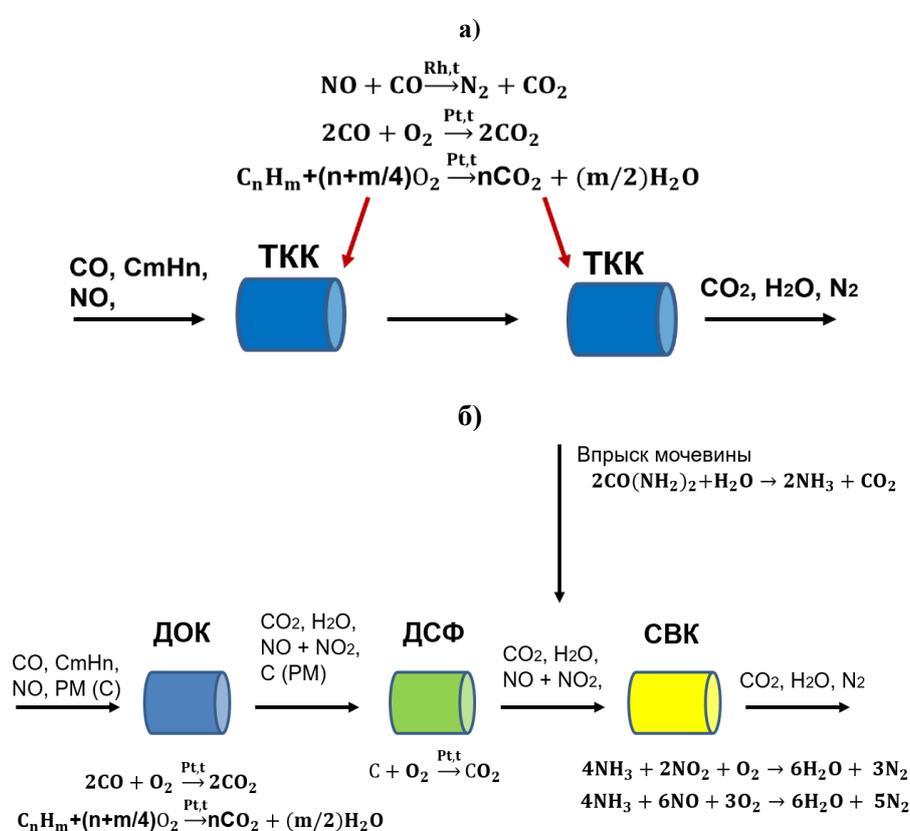


Рис. 1. Схематическое представление процесса обезвреживания токсичных компонентов ОГ современных бензиновых (а) и дизельных (б) двигателей

ТКК представляет собой монолитный керамический или металлический носитель, состоящий из множества продольных каналов (до 64 каналов на см²), на которые нанесено высокопористое покрытие с высоко развитой поверхностью, состоящее на 70–80 % из γ-Al₂O₃ с добавлением BaO для поддержания структуры и CeO₂ в качестве накопителя кислорода и содержащее благородные металлы Pt, Pd и Rh в качестве катализаторов (1–2 г). Процесс нейтрализации управляется электронным бортовым устройством (ЭБУ) впрыска топлива на основе информации о содержании кислорода в ОГ на входе и выходе из катализатора (там размещаются первичный и вторичный кислородные датчики).

У дизельных двигателей есть ряд отличительных особенностей по сравнению с бензиновыми, приводящими к более высоким выбросам загрязнителей: 1) используется более тяжелое и более склонное к сажеобразованию топливо; 2) в силу специфики организации процесса горения среда ОГ остается всегда окислительной, из-за чего невозможно одновременно организовать окисление угарного газа и несгоревших углеводородов и восстановление оксидов азота. В связи с этим современные системы нейтрализации ОГ дизельных двигателей легковых автомобилей включают дизельный окислительный катализатор, где осуществляется окисление СО и СН, систему рециркуляции ОГ, ДСФ, в котором накапливаются сажевые частицы, фильтр периодически регенерируется путем сжигания сажи; грузовые дизельные автомобили и автобусы дополнительно оснащаются селективным восстановительным катализатором для нейтрализации оксидов азота. Конструктивно и по принципу действия ДОК аналогичен ТКК, за исключением того, что не требуется добавление родия (катализатора реакции восстановления оксидов азота). ДСФ представляет собой керамический фильтр проточного типа сотовой структуры с множеством продольных каналов. Отработавшие газы после ДОК поступают в ДСФ, и мелкодисперсные частицы сажи адсорбируются на его развитой поверхности. Для очистки сажевого фильтра от накопленных частиц проводится регенерация ДСФ. Различают два вида регенерации: 1) естественную (или пассивную), она происходит при высоких оборотах двигателя, то есть при движении автомобиля на высоких скоростях, когда ОГ достигают температуры > 650 °С, при которой происходит сжигание частиц сажи; 2) принудительную (активную) – если автомобиль преимущественно эксплуатируется в городских условиях, температура ОГ не достигает значений, необходимых для естественной регенерации, и фильтр забивается частицами. Когда давление на входе в ДСФ возрастает, а на выходе из него, напротив, падает, информация об этом от датчиков давления передается в ЭБУ и автоматически запускается режим принудительной регенерации (обычно это происходит каждые 300–900 км пробега в зависимости от условий эксплуатации), заключающийся в повышении числа оборотов двигателя и впрыска дополнительного топлива для увеличения температуры ОГ.

Эффективная нейтрализация ОГ происходит при достижении ТКК и ДОК температуры 400 °С, штатный режим соответствует диапазону температур от 400 до 800 °С, регенерация ДСФ штатно осуществляется при температуре 600–800 °С.

Работа каталитических нейтрализаторов и сажевых фильтров управляется ЭБУ на основании информации, получаемой от датчиков температуры, давления, содержания кислорода в ОГ, датчиков системы рециркуляции ОГ и т.д. При серьезных неисправностях, связанных с нарушениями электронной системы управления впрыском топлива и с термодеструкцией ТКС, их температура может достигать более 1 000 °С.

Анализ пожаров АТС, вызванных пожароопасным режимом работы ТКС

Проблемы возгорания автомобилей по причине перехода ТКС в пожароопасный режим работы характерны сегодня в большей мере для электронно-управляемых ТКС и присущи как бензиновым автомобилям, оснащенным одним или двумя ТКК, так и дизельным автомобилям, оснащенным дизельным окислительным катализатором и керамическим ДСФ.

Проанализируем случаи возгорания АТС по причине аварийной пожароопасной работы ТКС.

В средствах массовой информации описаны, по крайней мере, два случая отзыва автомобилей производителями из-за неисправности системы управления впрыском топлива и один случай из-за перегрева двигателя, утечки масла и попадания его на перегретые поверхности двигателя и выпускной системы двигателя.

С 2015 г. корейские производители «Hyundai» и «Kia» отозвали почти 2,4 млн АТС из-за возгораний и неисправностей двигателя¹. Самый большой отзыв (почти 379 000 автомобилей) коснулся внедорожников «Kia Soul» с двигателями объемом 1,6 л, выпущенных с 8 июля 2011 г. по 11 августа 2016 г. Расследование в отношении них проводила Национальная администрация безопасности дорожного движения (США). Было установлено, что сбои в системе электронного управления впрыском топлива (пропуском зажигания) приводили к перегреву ОГ и каталитических нейтрализаторов, что вызывало термодеструкцию последних и привело в ряде случаев к возгоранию автомобилей. У отзыванных автомобилей были заменены бортовые компьютеры и поврежденные каталитические нейтрализаторы.

В сентябре 2018 г. итальянский производитель «Alfa Romeo» отозвал 34 359 седанов «Giulia» 2017–2018 гг. выпуска и внедорожников «Stelvio» 2018 г. выпуска из-за проблем с перегревом катализаторов.² Представители «Alfa Romeo» заявили, что проблема вызвана пропуском зажигания в двигателе и им известно о двух возгораниях в моторном отсеке, которые связаны с этой проблемой.

В январе 2017 г. представительство американского производителя «Ford» в Южной Африке отозвало 4 556 автомобилей модели «Ford Kuga» с двигателями объемом 1,6 л, произведенных в этой стране с декабря 2012 г. по февраль 2014 г.³ После расследования двух пожаров автомобилей было установлено, что они были вызваны перегревом двигателя, утечкой масла и попаданием его на перегретые поверхности двигателя и выпускной системы ОГ.

На сайте экспертного консультационного центра «Автотранспорт» (<http://avtotehexpert.ru/>) представлено заключение от специалиста 2018 г. по результатам проведенного автотехнического и пожарно-технического исследования причины возгорания автомобиля «Skoda Yeti»⁴. При осмотре автомобиля в левой и средней части днища автомобиля (ближе к катализатору) было зафиксировано выгорание пластиковой защиты и шумоизоляционного покрытия, также было обнаружено, что средний левый лонжерон и две тормозные магистрали (трубки) были отожжены (имели белый цвет), с левой стороны (по ходу движения) от катализатора была обнаружена копоть, под сгоревшими деталями были зафиксированы фрагменты сухой травы и песка (рис. 2).

Было установлено, что автомобиль до момента возгорания двигался по грунтовой полевой дороге, водитель почувствовал запах гари в салоне, и им были предприняты попытки потушить возгорание.

В ходе пожарно-технической экспертизы было установлено, что пожар возник из-за контакта сухой травы с перегретым катализатором, очаг пожара находился под днищем автомобиля в области между катализатором и местом отжига среднего левого лонжерона, двух тормозных магистралей (трубок).

¹ Hyundai, Kia recalls over 500K vehicles for fire risk. The Detroit news. URL: <https://www.detroitnews.com/story/business/autos/foreign/2019/02/28/hyundai-kia-recalls-vehicles-fire-risk/39127757/> (дата обращения: 28.02.2019).

² Keith Barry. The automaker says catalytic converters may overheat, which could cause a stall or a fire. Consumer reports. URL: https://www.consumerreports.org/car-safety/alfa-romeo-sedans-suvs-recalled-for-engine-fires/?srsltid=AfmBOorWo5vEK41QaJ6wNmQOwfxVCEIMdejXNWWdsmS0N7oTf2t9_0m0 (дата обращения: 28.02.2019).

³ Ford Issues Safety Recall for Kuga 1.6. URL: <https://www.ford.co.za/about-ford/newsroom/2017/ford-issues-safety-recall-for-kuga-1-6/> (дата обращения: 28.02.2019).

⁴ Комплексная автотехническая и пожарно-техническая экспертиза возгорания автомобиля Skoda Yeti. URL: <http://avtotehexpert.ru/nashi-avtoekspertizy/vozgoranie-avtomobilya-ot-katalizatora-99/> (дата обращения: 28.02.2019)



Рис. 2. Экспертиза автомобиля после пожара: красный овал – выгорание пластиковой защиты и шумоизоляционного покрытия; А – копоть слева (по ходу движения) от катализатора; Б – выгорание шумоизоляционного покрытия; В – средний левый лонжерон и две тормозные магистрали (трубки) отожжены (имеют белый цвет); Г – фрагменты сухой травы и песка под сгоревшими деталями (источник: <http://avtotehexpert.ru/nashi-avtoekspertizy/vozgoranie-avtomobilya-ot-katalizatora-99/>)

В работе [16] детально проанализирован случай пожара легкового дизельного автомобиля с пробегом около 83 000 км и сроком эксплуатации 4 г. 8 мес., произошедшего из-за перегрева ДСФ при движении в туннеле Хонджимун (Южная Корея) через пять дней после прохождения им технического обслуживания в сервисном центре производителя, где на автомобиле заменили два датчика температуры выхлопных газов и топливный фильтр. Сначала пожар был локализован службой туннеля с помощью пожарного гидранта, установленного внутри туннеля, и далее – полностью потушен прибывшими пожарными после вскрытия капота (рис. 3).



Рис. 3. Легковой дизельный автомобиль после пожара, туннель Хонджимун, Южная Корея, 2017 г. [16]

В ходе тщательного расследования были обоснованно исключены все прочие причины возгорания автомобиля за исключением перегрева ДСФ. Было установлено, что задняя часть корпуса ДСФ была оплавлена, керамический сотовый блок был поврежден (рис. 4 а), выхлопная труба, соединенная с ДСФ, изоляционный материал над ДСФ и нижняя часть корпуса ДСФ оплавилась, теплозащитный экран в нижней части кузова автомобиля вокруг сажевого фильтра тоже был частично оплавлен и частично выгорел, на внутренней стороне выхлопной трубы было обнаружено большое количество посторонних веществ белого цвета (рис. 4 б).

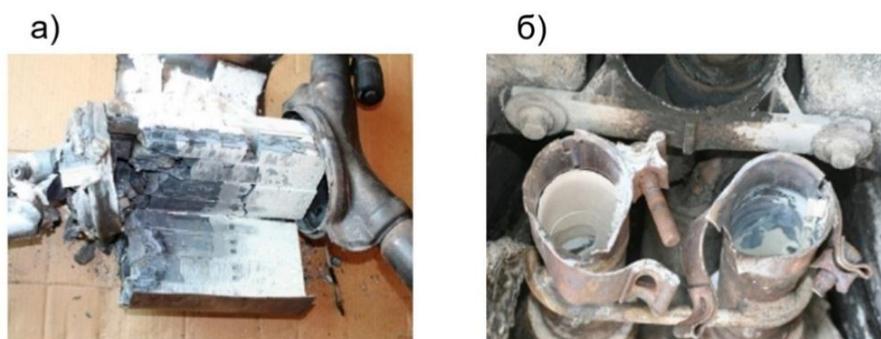


Рис. 4. а – поврежденный керамический сотовый блок ДСФ;
б – инородный материал белого цвета на внутренней поверхности выхлопной трубы легкового дизельного автомобиля после пожара, туннель Хонджимун, Южная Корея [16]

Это однозначно свидетельствует о перегреве керамического сотового блока ДСФ до такой степени, что привело к разрушению структуры носителя и повреждению корпуса и, как следствие, к воспламенению близко расположенного горючего материала.

Sun Jae Kim с коллегами провели экспертный анализ пожара автофургона, произошедшего в 2022 г. на подземной автостоянке во время разгрузки, и осуществили имитационное экспериментальное моделирование пожара похожего коммерческого автофургона, обусловленного высокотемпературной регенерацией ДСФ [17].

Коммерческий автофургон 2017 г. выпуска с пробегом 150 000 км проехал 103 км и был припаркован на погрузочной площадке подземной автостоянки (рис. 5 а). Пожар вспыхнул рядом с выходным патрубком выхлопной трубы примерно через 6 мин после парковки во время процесса разгрузки (рис. 5 б). По камерам видеонаблюдения было установлено, что бумажная коробка, стоявшая на погрузочной платформе, сдвинулась и пришла в соприкосновение с выхлопной трубой, далее загорелись рядом стоящие коробки и автомобиль. Пожар развился практически мгновенно. Первоначальный осмотр места пожара показал, что погрузочная платформа автофургона была сдвинута (рис. 5 г), автомобиль получил серьезные повреждения (рис. 5 в).

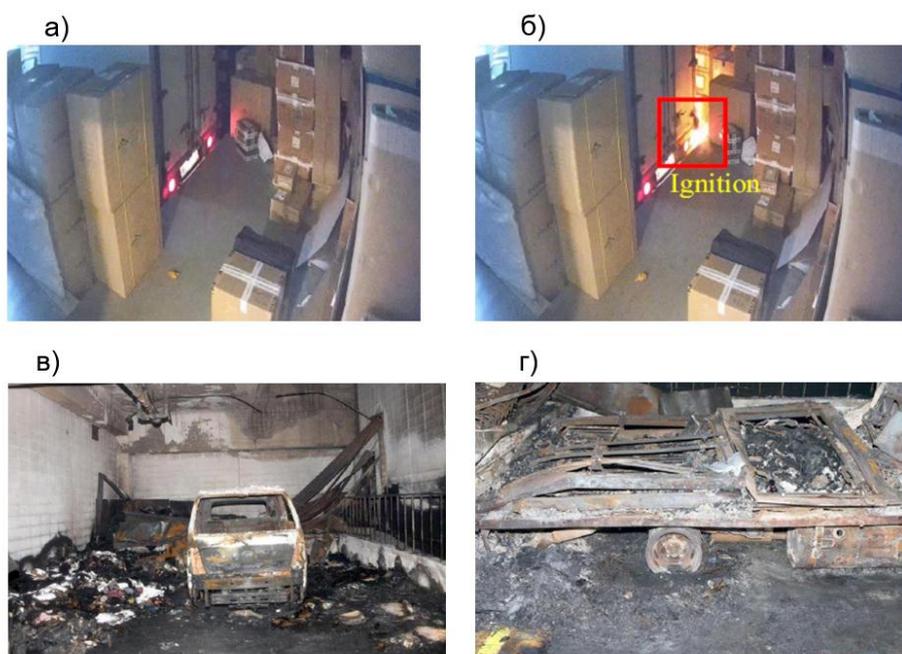


Рис. 5. а – автофургон въехал на автостоянку; б – начало пожара;
в; г – последствия пожара (Южная Корея, 2022 г.) [17]

Во время расследования было доказано, что возгорание произошло от соприкосновения картонной коробки с выхлопной трубой автомобиля.

Для подтверждения версии расследования экспертами был проведен натурный эксперимент на аналогичном автомобиле 2017 г. выпуска с пробегом около 200 000 км, который проехал до испытания около 103 км со скоростью 90–100 км/ч. Температура измерялась в состоянии естественной регенерации ДСФ (после пробега 103 км) с использованием для измерения температуры сканера G-scanM (рис. 6 а) и в состоянии принудительной регенерации ДСФ с использованием тепловизионной камеры и регистратора данных (рис. 6 б). Также измерялась температура выходного патрубка выхлопной трубы.

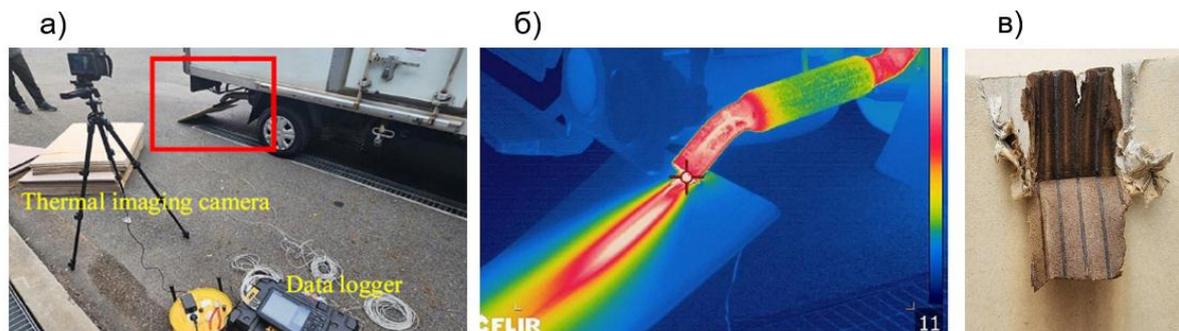


Рис. 6. Экспериментальное измерение температуры ДСФ:
а – при естественной регенерации после 103 км пробега; б – при принудительной регенерации с помощью тепловизионной камеры и регистратора данных; в – картонная коробка, обуглившаяся в результате воздействия ОГ во время регенерации ДСФ [17]

При естественной регенерации (во время движения) температура внутри ДСФ составила примерно 671 °С, а температура выходного патрубка сохранялась на уровне 311 °С в течение примерно 4 мин. При принудительной регенерации ДСФ (во время стоянки на холостых оборотах) температура ДСФ составила примерно 650 °С, а температура выходного патрубка стала увеличиваться примерно через 3 мин, достигнув максимального значения 366 °С через 6 мин 25 с. Несмотря на то, что в ходе эксперимента на срезе выхлопной трубы не была достигнута температура воспламенения картонных материалов (400–490 °С), имело место обугливание картонной коробки (рис. 6 в).

Анализ причин снижения эффективности ТКС и перехода их в аварийный пожароопасный режим работы

Основные причины потери эффективности (деактивации) ТКС связаны с их термодеструкцией (термическим старением) и отравлением «каталитическими ядами» (свинцом, серой, фосфором) [10, 11, 14, 15, 18, 19].

Хотя коммерческие ТКС рассчитаны на периодическую высокотемпературную работу, длительное и многократное воздействие температур выше 800 °С, особенно в окислительных условиях, может привести к ряду серьезных последствий. Высокие температуры могут вызвать оплавление металлической или спекание керамической подложки, отслаивание покрытия от носителя, инактивацию благородных металлов из-за высокотемпературного окисления [15].

В работе [18] описаны результаты исследования 72-часового высокотемпературного воздействия (температура 1 200 °С) на структуру γ -Al₂O₃-носителя и на благородные металлы серийно выпускаемого палладий-родиевого катализатора. С помощью методов рентгеновской флуоресценции, атомно-адсорбционной спектроскопии, N₂-физисорбции, рентгеновской дифракции, температурно-программируемого восстановления (TPR) и сканирующей электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионным рентгеновским анализом (SEM-EDX) были исследованы изменения, произошедшие с носителем и благородными металлами-катализаторами ТКС, а также оценено снижение эффективности

каталитического окисления стандартной газовой смеси $\text{CO-C}_3\text{H}_8$, имитирующей состав ОГ автомобильного двигателя. Результаты подтвердили преобразование $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в высокотемпературные модификации и образование новых смешанных оксидных форм. Было доказано наличие спеченных фрагментов покрытия и подложки катализатора и обнаружено несколько пятен агломератов палладия. Также было подтверждено влияние термической дезактивации катализатора на эффективность окисления угарного газа и пропана.

Kumar Matam с коллегами исследовали влияние термической и химической дезактивации модельного трехкомпонентного $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Pd}$ - катализатора на нейтрализацию ОГ автомобиля, работающего на сжатом природном газе [19]. Термическую обработку катализатора проводили в течение 5 ч при 700°C , а химическую – с использованием воздушной смеси, содержащей 1,8–7,5 масс. % фосфора. Оценка состояния носителя и катализатора проводилась методами N_2 -физисорбции, CO -хемосорбции, высокоугловой кольцевой сканирующей просвечивающей электронной микроскопии в темном поле (HAADF-STEM), рентгеновской дифракции (XRD), твердотельного ядерного магнитного резонанса, H_2 -температурно-программируемого восстановления ($\text{H}_2\text{-TPR}$), in-situ рентгеновской адсорбционной спектроскопии. Результаты показали, что термическое старение при температуре 700°C привело к таким физическим изменениям, как уменьшение площади поверхности носителя и дисперсии палладия. В то время как химическое старение вызвало одновременно серьезные физические и химические изменения: засорение пор носителя, загрязнение наночастиц палладия фосфором, преобразование оксида алюминия в фосфат алюминия, снижение восстанавливаемости PdO_x . Было также подтверждено, что простое термическое старение значительно снижало эффективность окисления CO и CH_4 .

Как упоминалось выше, одна из основных причин экстремального разогрева катализатора связана с пропусками зажигания. В статье [20] представлены результаты экспериментально-расчетного исследования зависимости температуры катализатора от различных условий работы двигателя. Все эксперименты проводились на двигателе с искровым зажиганием объемом 1,0 л при оборотах коленчатого вала двигателя 1 500–4 000 об/мин на режимах от холостого хода до полной нагрузки. Температура выхлопных газов и температура катализатора измерялись в зависимости от значения лямбда (0,8–1,2), угла опережения зажигания ($\text{BTDC } 30^\circ\text{--ATDC } 30^\circ$) и частоты пропусков зажигания (0–28 %). Эксперимент проводился с генератором пропусков зажигания, так что пропуски зажигания происходили в четырех цилиндрах случайным образом. Была выявлена линейно возрастающая зависимость между температурой катализатора и частотой пропусков зажигания при различных нагрузках двигателя (рис. 7) и практически отсутствие влияния пропусков зажигания на температуру ОГ на входе в катализатор (рис. 8).

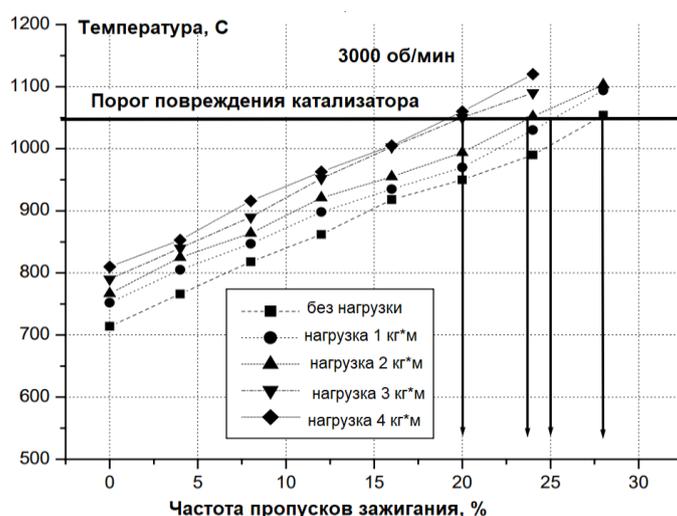


Рис. 7. Влияние пропусков зажигания на температуру катализатора при различных нагрузках при 3 000 об/мин [18]

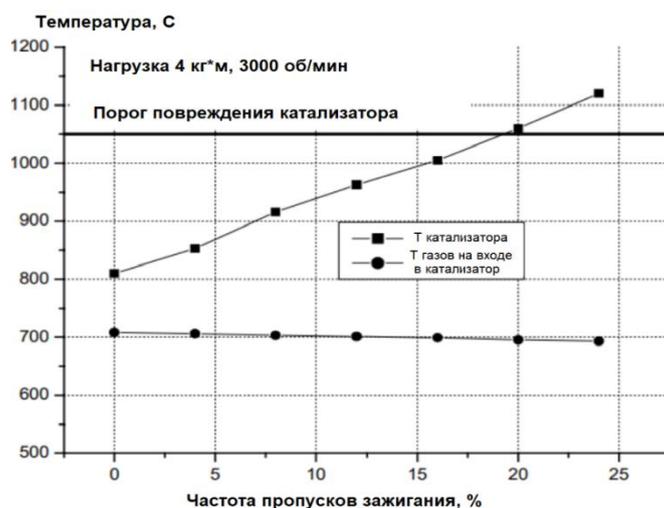


Рис. 8. Влияние частоты пропусков зажигания на температуру каталитического нейтрализатора и температуру ОГ на входе в каталитический нейтрализатор [18]

Было обнаружено, что пропуски зажигания приводят к попаданию топлива и избыточного кислорода в каталитический нейтрализатор, это «разгоняет» экзотермические процессы окисления, приводит к возрастанию температуры внутри каталитической системы, к резкому термическому старению и дезактивации каталитического нейтрализатора, возрастанию риска пожарной опасности.

В Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России под руководством доктора технических наук, профессора В.Н. Ложкина более 20 лет занимаются разработкой научных основ, моделей и методов исследования пожароопасных процессов, протекающих в ТКС автомобилей [9, 21–24]. В работах [9, 21–24] уточнена физическая и кинетическая модель нейтрализации поллютантов ОГ на примере исследования каталитических нейтрализаторов и сажевых фильтров, обоснованы диагностические параметры контроля аварийных (по эффективности нейтрализации и пожарной опасности) режимов работы ТКС по составу ОГ и предложен алгоритм их экспериментально-расчетной оценки.

Ложкиным В.Н. и коллегами на основании теории катализа Г.К. Борескова с учетом фундаментальных законов химической кинетики и массо- и теплопереноса в газовой и твердой фазе была разработана физико-химическая модель гетерогенного катализа в проточном дизельном окислительном каталитическом нейтрализаторе [25]. На основании экспериментально-расчетных испытаний каталитических нейтрализаторов В.Н. Ложкиным было доказано, что сначала при штатном разогреве каталитического нейтрализатора скорость нейтрализации поллютантов лимитируется скоростью внутрипоровой диффузии реагентов (эта область называется внутренней диффузионной областью), по мере роста температуры скорость реакции ограничивается внешней диффузией реагирующих веществ из газового потока к поверхности каталитического покрытия (эта область называется внешней диффузионной областью), а потом при дальнейшем разогреве реакция протекает преимущественно на внешней поверхности активного слоя и на этой стадии лимитируется скоростью реакции (эта область называется внешней кинетической областью).

На основании экспериментально-расчетных испытаний дизеля 8ЧН 12/12 (КАМАЗ) с каталитическим нейтрализатором оригинальной конструкции по результатам измерения температуры реакционной среды и значениям концентраций СО, СН и сажи в ОГ было подтверждено, что предаварийный разогрев каталитического нейтрализатора начинается во внутренней диффузионной области и продолжается во внешней диффузионной области, а высокоэкзотермические аварийные пожароопасные процессы развиваются во внешней кинетической области.

Оценка теплового эффекта реакции окисления на предаварийном режиме работы катализатора проводилась по уравнению:

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

где ΔH – изменение энтальпии реакции, кДж/моль; λ – коэффициент теплопроводности носителя $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ Вт/(м·К); c и T – соответственно текущие значения концентрации реагирующего вещества (моль/л) и температуры реакции (К); c_1 и T_1 – соответственно значения концентрации реагирующего вещества (моль/л) и температуры (К) на внешней поверхности катализатора со стороны ядра потока ОГ.

Результаты экспериментально-расчетных исследований показали, что при переходе от режима холостого хода к максимальной нагрузке двигателя в штатном режиме эффективность каталитического окисления поллютантов изменялась от 20 до 95 %, а тепловой эффект процесса – от 203 до 28 167 кДж. Также было подтверждено, что 10-кратное увеличение содержания в выхлопных газах СО, СН и сажи приводило к увеличению теплового эффекта каталитического процесса от 17 282 до 491 907 кДж/ч, создавая угрозу возгорания.

Ложкиным В.Н. и с Осиповым Д.В. была разработана методика диагностирования аварийного пожароопасного режима работы ДСФ по показателям дымности ОГ на режиме максимальной нагрузки двигателя и на режиме свободного ускорения [21, 24].

В таблице приведены результаты испытаний автомобиля «Ford Mondeo» с двигателем TDCi, оснащенного дизельным двигателем, ДОК и ДСФ.

Таблица

**Результаты измерения дымности ОГ «Ford Mondeo»
на режиме максимальной нагрузки и свободного ускорения [21, 24]**

№ измерения	Дымность, м ⁻¹	Среднее значение дымности, м ⁻¹ (%)	Нормативное значение дымности, м ⁻¹ (%)
После регенерации ДСФ на режиме максимальной нагрузки			
1	1,65	1,34 (44)	0,4 (15)
2	1,35		
3	1,10		
4	1,25		
На режиме свободного ускорения			
1	5,92	≈ 4,0 (82)	1,6 (50)
2	4,28		
3	3,37		
4	3,48		
5	3,73		
6	3,32		

При резком увеличении нагрузки наблюдались залповые выбросы частиц сажи (черный дым), а при регенерации ДСФ – его аварийный пожароопасный разогрев. Данные, приведенные в таблице, свидетельствуют о многократном превышении норматива дымности ОГ, установленных для дизельных двигателей такого типа. Причина преждевременного выхода из строя каталитического нейтрализатора заключалась в использовании владельцем некачественного топлива, повлекшего за собой коррозионные изменения в топливной аппаратуре и сбои в подаче топлива.

Заключение

В статье представлен критический анализ и обобщение статистических данных и результатов исследований по пожарам АТС, вызванных пожароопасной эксплуатацией каталитических нейтрализаторов и ДСФ (элементов системы выпуска ОГ), а также методов исследования и диагностирования аварийных пожароопасных режимов работы ТКС.

Результаты расследования пожаров автомобилей свидетельствует о том, что аварийный пожароопасный режим работы ТКС, связанный с их экстремальным разогревом (до температуры 1 000 °С и более), является довольно распространенной причиной возникновения пожаров на автотранспорте. Перегрев катализаторов современных АТС связан, главным образом, с некорректной работой электронной системы управления впрыском топлива, обусловленной некорректным функционированием датчиков температуры, давления, кислорода и прочими причинами. Из-за этого могут иметь место пропуски зажигания, подача избыточного количества топлива в камеру сгорания двигателя, наличие в ОГ несгоревшего топлива, что может приводить практически неконтролируемому «разгону» экзотермических реакций окисления угарного газа и углеводородов и резкому росту температуры внутри катализатора. Такой аварийный пожароопасный режим работы приводит к инактивации металлов-катализаторов (Pt, Pd, Rh), деструкции γ -Al₂O₃-покрытия, спеканию и разрушению керамического носителя, нарушению целостности корпуса катализатора. Рассмотренные в статье случаи пожаров указывают на то, что возгорание возникает тогда, когда горючие вещества и материалы приходят в соприкосновение с перегретыми (раскаленными) элементами системы выпуска ОГ.

Инактивация и разрушение ТКС сопровождается снижением эффективности нейтрализации поллютантов, и это явление было положено в основу разработанной специалистами Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России оригинальной методики диагностирования аварийных режимов работы ТКС, выявляющей закономерные связи между качественно-количественным составом ОГ и конкретными неисправностями устройств и систем двигателя и топливной аппаратуры, обеспечивающими качество приготовления горючей смеси, полноту ее сгорания в цилиндрах двигателя и нейтрализации вредных веществ в каталитических нейтрализаторах.

В целом необходимо отметить, что хотя пожары современных АТС, связанные с аварийной работой ТКС, явление нередкое, количество исследовательских работ по анализу и обобщению статистики подобных пожаров, методам расследования причин их возникновения, профилактическим мерам весьма ограничены.

Список источников

1. Трофименко Ю.В., Комков В.И. Актуализированный прогноз численности, структуры автомобильного парка России по типу энергоустановок и выбросов парниковых газов до 2050 года // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2023. Т. 20. № 3 (91). С. 350–361. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361.
2. Ложкина О.В., Мальчиков К.Б. Сравнительный анализ пробеговых выбросов автомобилей на различных видах топлива при дорожных заторах // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 2 (103). С. 133–143. DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-2-133-143.
3. Ложкин В.Н., Ложкина О.В. Повышение качества информационной поддержки контроля загрязнения атмосферного воздуха поллютантами автотранспорта на примере Санкт-Петербурга // Вода и экология: проблемы и решения. 2021. № 2 (86). С. 65–74. DOI: 10.23968/2305-3488.2021.26.2.65-74.
4. Ложкин В.Н., Калимуллина И.Ф., Сагиров Э.А. Контроль чрезвычайного загрязнения воздуха транспортом Санкт-Петербурга по критериям наносимого ущерба // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 2 (70). С. 95–101. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-95-101.

5. Recent Advances in the Development of Automotive Catalytic Converters: A Systematic Review / L. Robles-Lorite [et al.] // *Energies*. 2023. Vol. 16 (18). P. 6425. DOI: 10.3390/en16186425.
6. Ложкина О.В., Онищенко И.А. Методика оценки выбросов опасных компонентов отработавших газов при пуске и прогреве двигателей автотранспортных средств в климатических условиях Арктики // *Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петербур. ун-та ГПС МЧС России»*. 2020. № 3. С. 30–37.
7. 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 (6). P. 2383–2397. DOI: 10.1002/ese3.416.
8. Гавкалюк Б.В., Ложкин В.Н. Научные основы предупреждения возгорания автомобильных нейтрализаторов в эксплуатации // *Проблемы управления рисками в техносфере*. 2023. № 4 (68). С. 100–105.
9. Ложкин В.Н. Теоретические основы и практика диагностики эколого-пожароопасных аварийных режимов эксплуатации каталитических систем автотранспорта // *Мир транспорта и технологических машин*. 2023. № 1–2 (80). С. 74–80. DOI: 10.33979/2073-7432-2023-2(80)-1-74-80.
10. Modeling and deterioration diagnosis of catalyst on vehicle by variable forgetting factor-based on-line identification method / S. Hashimoto [et al.] // *14th IFAC Symposium on System Identification*. Newcastle, Australia, 2006. P. 1364–1369.
11. De Almeida P.R., Nakamura A.L., Sodré J.R. Evaluation of catalytic converter aging for vehicle operation with ethanol // *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 71. Iss. 1. P. 335–341. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.06.069.
12. Dehaan J., Kirk P., Icove D. *Kirk's fire investigation*. 7th. London, England: Pearson; 2011. 763 p.
13. Analysis on Vehicle Fires Caused by Damage of Diesel Particulate Filter (DPF) / J.-Yu. Song [et al.] // *J. Kor. Inst. Fire Sci. Eng.* 2012. Vol. 26. № 4. P. 70–76. DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2012.26.4.070>.
14. Recent Advances in the Development of Automotive Catalytic Converters: A Systematic Review / L. Robles-Lorite [et al.] // *Energies*. 2023. Vol. 16 (18). 6425. DOI: 10.3390/en16186425/.
15. Онищенко И.А. Методика прогнозирования чрезвычайного загрязнения воздуха городов арктической зоны автотранспортом: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: С.-Петербур. ун-т ГПС МЧС России. 181 с.
16. Lee Eui-Pyeong. Analysis of a Car Fire Case Caused by the Overheating of a Diesel Particulate Filter // *Fire Science and Engineering*. 2017. Vol. 31. Iss. 1. P. 89–97. DOI: 10.7731/KIFSE.2017.31.1.089.
17. Experimental Study on a Fire Caused by Diesel Particulate Filter Regeneration / Sun Jae Kim [et al.] // *Fire Sci. Eng.* 2023. Vol. 37. № 5. P. 53–57. DOI: 10.7731/KIFSE.9291ed74.
18. The influence of temperature on the deactivation of commercial Pd/Rh automotive catalysts / D.M. Fernandes [et al.] // *Process Safety and Environmental Protection*. 2009. Vol. 87. Iss. 5. P. 315–322. DOI: 10.1016/j.psep.2009.05.002.
19. Thermal and chemical aging of model three-way catalyst Pd/Al₂O₃ and its impact on the conversion of CNG vehicle exhaust / Kumar Matam [et al.] // *Catalysis Today*. 2012. Vol. 184. Iss. 1. P. 237–244. DOI: 10.1016/j.cattod.2011.09.030.
20. Effects of Engine Operating Conditions on Catalytic Converter Temperature in an SI Engine / S. Lee [et al.] // *Society of Automotive Engineers*. 2002. DOI: 10.4271/2002-01-1677.
21. Осипов Д.В. Методика прогнозирования эффективности и пожарной безопасности нейтрализаторов транспортных средств: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: С.-Петербур. ун-т ГПС МЧС России, 2011. 165 с.
22. Гавкалюк Б.В., Ложкин В.Н. Обеспечение пожарной безопасности сложных электронно-управляемых термокatalитических систем двигателей внутреннего сгорания:

теоретические основы, диагностирование // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2023. № 4 (48). С. 15–22.

23. Ложкин В.Н. Теоретические и прикладные аспекты обеспечения комплексной пожарно-экологической безопасности топливно-каталитических систем в перспективе устойчивого развития международных перевозок // Проблемы международной транспортной политики: материалы Междунар. конф. М., 2022. С. 70–75.

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

25. Ложкин В.Н. Теория и практика безразборной диагностики и каталитической нейтрализации отработавших газов дизелей: дис. ... д-ра техн. наук. СПб.: ГТУ, 1995. 444 с.

References

1. Trofimenko Yu.V., Komkov V.I. Aktualizirovannyj prognoz chislennosti, struktury avtomobil'nogo parka Rossii po tipu energoustanovok i vybrosov parnikovyh gazov do 2050 goda // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta. 2023. Т. 20. № 3 (91). С. 350–361. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361.

2. Lozhkina O.V., Mal'chikov K.B. Cravnitel'nyj analiz probegovyh vybrosov avtomobilej na razlichnyh vidah topliva pri dorozhnyh zatorah // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2024. № 2 (103). С. 133–143. DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-2-133-143.

3. Lozhkin V.N., Lozhkina O.V. Povyshenie kachestva informacionnoj podderzhki kontrolya zagryazneniya atmosfernogo vozduha pollyutantami avtotransporta na primere Sankt-Peterburga // Voda i ekologiya: problemy i resheniya. 2021. № 2 (86). С. 65–74. DOI: 10.23968/2305-3488.2021.26.2.65-74.

4. Lozhkin V.N., Kalimullina I.F., Sagirov E.A. Kontrol' chrezvychajnogo zagryazneniya vozduha transportom Sankt-Peterburga po kriteriyam nanosimogo ushcherba // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2024. № 2 (70). С. 95–101. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-2-95-101.

5. Recent Advances in the Development of Automotive Catalytic Converters: A Systematic Review / L. Robles-Lorite [et al.] // Energies. 2023. Vol. 16 (18). P. 6425. DOI: 10.3390/en16186425.

6. Lozhkina O.V., Onishchenko I.A. Metodika ocenki vybrosov opasnyh komponentov otrabotavshih gazov pri puske i progreve dvigatelej avtotransportnyh sredstv v klimaticeskikh usloviyah Arktiki // Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii». 2020. № 3. С. 30–37.

7. Gao J., Tian G., Sorniotti A. On the emission reduction through the application of an electrically heated catalyst to a diesel vehicle // Energy Science & Engineering. 2019. Vol. 7 (6). P. 2383–2397. DOI: 10.1002/ese3.416.

8. Gavkalyuk B.V., Lozhkin V.N. Nauchnye osnovy preduprezhdeniya vozgoraniya avtomobil'nyh nejtralizatorov v ekspluatatsii // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 4 (68). С. 100–105.

9. Lozhkin V.N. Teoreticheskie osnovy i praktika diagnostiki ekologo-pozharoopasnyh avarijnyh rezhimov ekspluatatsii kataliticheskikh sistem avtotransporta // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2023. № 1–2 (80). С. 74–80. DOI: 10.33979/2073-7432-2023-2(80)-1-74-80.

10. Modeling and deterioration diagnosis of catalyst on vehicle by variable forgetting factor-based on-line identification method / S. Hashimoto [et al.] // 14th IFAC Symposium on System Identification. Newcastle, Australia, 2006. P. 1364–1369.

11. De Almeida P.R., Nakamura A.L., Sodr  J.R. Evaluation of catalytic converter aging for vehicle operation with ethanol // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 71. Iss. 1. P. 335–341. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.06.069.

12. Dehaan J., Kirk P., Icove D. Kirk's fire investigation. 7th. London, England: Pearson; 2011. 763 p.

13. Analysis on Vehicle Fires Caused by Damage of Diesel Particulate Filter (DPF) / J.-Yu. Song [et al.] // J. Kor. Inst. Fire Sci. Eng. 2012. Vol. 26. № 4. P. 70–76. DOI: <http://dx.doi.org/10.7731/KIFSE.2012.26.4.070>.

14. Recent Advances in the Development of Automotive Catalytic Converters: A Systematic Review / L. Robles-Lorite [et al.] // Energies. 2023. Vol. 16 (18). 6425. DOI: [10.3390/en16186425/](https://doi.org/10.3390/en16186425/).

15. Onishchenko I.A. Metodika prognozirovaniya chrezvychnogo zagryazneniya vozduha gorodov arkticheskoy zony avtotransportom: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii. 181 s.

16. Lee Eui-Pyeong. Analysis of a Car Fire Case Caused by the Overheating of a Diesel Particulate Filter // Fire Science and Engineering. 2017. Vol. 31. Iss. 1. P. 89–97. DOI: [10.7731/KIFSE.2017.31.1.089](https://doi.org/10.7731/KIFSE.2017.31.1.089).

17. Experimental Study on a Fire Caused by Diesel Particulate Filter Regeneration / Sun Jae Kim [et al.] // Fire Sci. Eng. 2023. Vol. 37. № 5. P. 53–57. DOI: [10.7731/KIFSE.9291ed74](https://doi.org/10.7731/KIFSE.9291ed74).

18. The influence of temperature on the deactivation of commercial Pd/Rh automotive catalysts / D.M. Fernandes [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. 2009. Vol. 87. Iss. 5. P. 315–322. DOI: [10.1016/j.psep.2009.05.002](https://doi.org/10.1016/j.psep.2009.05.002).

19. Thermal and chemical aging of model three-way catalyst Pd/Al₂O₃ and its impact on the conversion of CNG vehicle exhaust / Kumar Matam [et al.] // Catalysis Today. 2012. Vol. 184. Iss. 1. P. 237–244. DOI: [10.1016/j.cattod.2011.09.030](https://doi.org/10.1016/j.cattod.2011.09.030).

20. Effects of Engine Operating Conditions on Catalytic Converter Temperature in an SI Engine / S. Lee [et al.] // Society of Automotive Engineers. 2002. DOI: [10.4271/2002-01-1677](https://doi.org/10.4271/2002-01-1677).

21. Osipov D.V. Metodika prognozirovaniya effektivnosti i pozharnoj bezopasnosti nejtralizatorov transportnyh sredstv: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2011. 165 c.

22. Gavkalyuk B.V., Lozhkin V.N. Obespechenie pozharnoj bezopasnosti slozhnyh elektronno-upravlyaemyh termokataliticheskikh sistem dvigatelej vnutrennego sgoraniya: teoreticheskie osnovy, diagnostirovanie // Prirodnye i tekhnogennye riski (fiziko-matematicheskie i prikladnye aspekty). 2023. № 4 (48). S. 15–22.

23. Lozhkin V.N. Teoreticheskie i prikladnye aspekty obespecheniya kompleksnoj pozharno-ekologicheskoy bezopasnosti toplivno-kataliticheskikh sistem v perspektive ustojchivogo razvitiya mezhdunarodnyh perevozok // Problemy mezhdunarodnoj transportnoj politiki: materialy Mezhdunar. konf. M., 2022. S. 70–75.

24. Lozhkin V.N. Teoriya i praktika diagnostiki pozharopasnyh rezhimov ekspluatatsii kataliticheskikh nejtralizatorov // Pozharovzryvobezopasnost'. 2022. T. 31. № 3. S. 65–74. DOI: [10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74](https://doi.org/10.22227/0869-7493.2022.31.03.65-74).

25. Lozhkin V.H. Teoriya i praktika bezrazbornoj diagnostiki i kataliticheskoy nejtralizatsii otrabotavshih gazov dizelej: dis. ... d-ra tekhn. nauk. SPb.: GTU, 1995. 444 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 11.07.2024; одобрена после рецензирования: 24.07.2024;
принята к публикации: 12.09.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 11.07.2024; approved after review: 24.07.2024;
accepted for publication: 12.09.2024

Информация об авторах:

Дейнека Евгений Григорьевич, начальник Главного управления МЧС России по Ленинградской области (188662, Ленинградская обл., Всеволожский р-н, г. Мурино, ул. Оборонная, д. 51)

Ложкина Ольга Владимировна, профессор кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, кандидат химических наук, профессор, e-mail: olojkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8604-2698>, SPIN-код: 6275-4249

Information about the authors:

Deineka Evgeny G., head of the main directorate of EMERCOM of Russia in the Leningrad region (188662, Leningrad region, Vsevolozhsky district, Murino city, Oboronnaya street, 51)

Lozhkina Olga V., professor of the department of chemistry and combustion processes of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, candidate of chemical sciences, professor, e-mail: olojkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8604-2698>, SPIN: 6275-4249