

Научная статья

УДК: 628.9:629.3:504.3; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-251-266

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ НЕГАТИВНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ПОЖАРНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ НА РЕЖИМЕ СВОБОДНОГО УСКОРЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ РОБОТИЗИРОВАННОГО МАНИПУЛЯТОРА

✉ Ложкин Владимир Николаевич.

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

Сацук Иван Владимирович.

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

✉ vnllojkin@yandex.ru

Аннотация. Целью работы является повышение объективности и достоверности оригинального метода оценки негативного экологического воздействия дизельных пожарных автомобилей на воздушную среду путем автоматизации процедуры измерения дымности отработавших газов на режиме свободного ускорения. Разработан роботизированный манипулятор для замены водителя-оператора при выполнении стандартизированного цикла свободного ускорения в части контроля дымности как технического норматива экологической безопасности по действующему законодательству. Проведены сравнительные экспериментальные исследования на парке дизельных пожарных автомобилей с одновременным использованием ручного метода и автоматизированной системы. Для обработки результатов применялись методы математической статистики, включая расчет коэффициента вариации и линейной корреляции. Теоретической основой диагностирования выступили физико-химические модели процессов сажеобразования в топливном факеле и работы каталитических нейтрализаторов, описываемые системой кинетических уравнений и критерием диффузионных ограничений (модуль Тиле). Установлено, что применение роботизированного манипулятора позволяет существенно повысить воспроизводимость измерений дымности отработавших газов. Коэффициент вариации результатов снизился с 18,1 % (ручной метод) до 6,9 % (автоматизированный метод). Полученные стабильные данные позволили выявить сильную статистически значимую корреляцию между дымностью и пробегом пожарных автомобилей (коэффициент детерминации $R^2 = 0,87$). Показано, что дымность является интегральным параметром, пригодным для оценки снижения коэффициента эффективности каталитического нейтрализатора вследствие деградации его активного слоя. Научная новизна заключается в разработке комплексного метода, интегрирующего аппаратную платформу, измерительную процедуру и аналитический аппарат на основе физико-химических моделей для диагностирования дизельных пожарных автомобилей. Впервые для данного вида техники показана возможность использования стабильных данных о дымности в качестве надежного входного параметра для моделей, основанных на теории диффузионных ограничений. Практическая значимость результатов состоит в создании инструмента для формирования надежной доказательной базы экологического контроля, превентивного выявления технических неисправностей и пожарно-опасных режимов работы каталитического нейтрализатора, а также для разработки систем прогнозирования остаточного ресурса систем нейтрализации.

Ключевые слова: дизельные пожарные автомобили, дымность отработавших газов, свободное ускорение, роботизированный манипулятор, технический норматив экологической безопасности, каталитический нейтрализатор

Для цитирования: Ложкин В.Н., Сацук И.В. Совершенствование метода оценки негативного экологического воздействия дизельных пожарных автомобилей на режиме свободного ускорения с применением роботизированного манипулятора // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 4 (76). С. 251–266. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-251-266.

Scientific article

ENHANCEMENT OF THE METHODOLOGY FOR ASSESSING THE NEGATIVE ENVIRONMENTAL IMPACT OF DIESEL FIRE ENGINES IN THE FREE ACCELERATION MODE USING A ROBOTIC MANIPULATOR

✉ Lozhkin Vladimir N.

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

Satsuk Ivan V.

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

✉ vnlojkin@yandex.ru

Abstract. The aim of this study is to improve the objectivity and validity of an original methodology for assessing the negative environmental impact of diesel fire trucks on the air by automating the procedure for measuring exhaust gas smoke in free acceleration mode. A robotic manipulator has been developed to replace the human operator during a standardized free acceleration cycle for smoke control, as a technical standard for environmental safety under current legislation. Comparative experimental studies were conducted on a fleet of diesel fire trucks using both a manual method and an automated system. The results were processed using mathematical statistics, including the calculation of the coefficient of variation and linear correlation. The theoretical basis for the diagnostics was provided by physicochemical models of soot formation in the fuel plume and the operation of catalytic converters, described by a system of kinetic equations and the diffusion limitation criterion (Thiele modulus). It has been established that the use of a robotic manipulator can significantly improve the reproducibility of exhaust smoke measurements. The coefficient of variation of the results decreased from 18,1 % (manual method) to 6,9 % (automated method). The obtained stable data allowed us to identify a strong statistically significant correlation between smoke emission and the mileage of fire trucks (determination coefficient $R^2 = 0,87$). Smoke emission was shown to be an integral parameter suitable for assessing the reduction in the efficiency of a catalytic converter due to the degradation of its active layer. The scientific novelty lies in the development of a comprehensive methodology integrating a hardware platform, a measurement procedure, and an analytical apparatus based on physicochemical models for diagnosing diesel fire trucks. For the first time in this type of technology, the possibility of using stable smoke emission data as a reliable input parameter for models based on diffusion limitation theory was demonstrated. The practical significance of the results lies in the creation of a tool for generating a reliable evidence base for environmental monitoring, proactively identifying technical faults and fire-hazardous conditions, and developing systems for predicting the remaining life of fire suppression systems.

Keywords: diesel fire trucks, exhaust smoke, free acceleration, robotic manipulator, environmental safety technical standard, catalytic converter

For citation: Lozhkin V.N., Satsuk I.V. Enhancement of the methodology for assessing the negative environmental impact of diesel fire engines in the free acceleration mode using a robotic manipulator // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 4 (76). P. 251–266. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-251-266.

Введение. Состояние проблемы

Экологическая безопасность автотранспорта остается одной из наиболее острых проблем урбанизированных территорий. На долю автомобильного транспорта в России приходится до 43 % от общего объема выбросов вредных веществ в атмосферу, причем значительную часть этого объема составляют выбросы от дизельных двигателей [1, 2].

Современные исследования и официальные данные подтверждают, что автомобильный транспорт является доминирующим источником загрязнения атмосферного воздуха в городских агломерациях России. Согласно анализу методических подходов к оценке выбросов доля транспорта в загрязнении атмосферного воздуха в городах достигает 75–80 %, а в центральных частях крупнейших мегаполисов, таких как Москва, превышает 90 % [3]. Особую актуальность в этом контексте приобретает контроль выбросов именно от дизельной техники, в том числе специального назначения [4–6]. При этом существующие официальные оценки выбросов от передвижных источников могут не отражать реальной картины из-за отсутствия корректных исходных данных и адекватных расчетных методик [7, 8], что подчеркивает важность совершенствования инструментального контроля, в частности, измерений дымности.

Особое место в структуре спецтранспорта занимают пожарные автомобили (ПА), силовые установки которых в процессе эксплуатации подвергаются экстремальным нагрузкам, включая форсированные режимы при следовании на пожар и длительные стационарные режимы при работе пожарного насоса. Эти факторы способствуют интенсивному износу деталей цилиндрапоршневой группы и топливной аппаратуры, что неизбежно приводит к увеличению токсичности и дымности отработавших газов (ОГ) [9, 10].

Дымность ОГ дизельных ПА является не только диагностическим параметром, характеризующим техническое состояние двигателя, но и ключевым техническим нормативом экологической безопасности в оценке их негативного воздействия на окружающую среду и здоровье человека по действующим воздухоохранным нормам. Как показано в исследованиях [11, 12], в составе дымовых газов присутствуют высокотоксичные компоненты, представляющие прямую угрозу: сажа (твердые углеродные частицы), полициклические ароматические углеводороды (включая канцерогенный бенз(а)пирен 1-го класса опасности), а также оксиды азота и углерода. Многокомпонентный состав и характеристики опасности основных загрязнителей, содержащихся в ОГ двигателя внутреннего сгорания (ДВС), приведены в табл. 1 [13]. Длительное воздействие этих веществ на организм человека связывают с ростом респираторных, сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний, что определяет высокую социальную значимость контроля выбросов [14].

Таблица 1

Состав и характеристика опасности основных соединений ОГ ДВС

Вещество или сумма веществ	Содержание, об. %	Качественная характеристика токсичности	Класс опасности	ПДК _{м.р.} , мг/м ³
Азот (N ₂)	75–78	нетоксичен	–	–
Кислород (O ₂)	2–20	нетоксичен	–	–
Углекислый газ (CO ₂)	0,5–12	нетоксичен	–	–
Пары воды	10–12	нетоксичен	–	–
Водород (H ₂)	0,01–0,5	нетоксичен	–	–

Вещество или сумма веществ	Содержание, об. %	Качественная характеристика токсичности	Класс опасности	ПДК _{м.р.} , мг/м ³
Окись углерода (CO)	0,001–1,0	КЯ, НС	4	5
Углеводороды (CH) в пересчете на пропан (C ₃ H ₈)	0,001–0,2	КЯ, КТ, Г, НС, Н, П, ПО, СС, С, РС	2–4	–
Окислы азота (NO _x) в пересчете на NO ₂	0,02–0,2	КЯ, КТ, НС, О, П, РС	2	0,2
Сернистый ангидрид (SO ₂)	0,002–0,02	У, О, Г, РС	3	0,5
Сажа (взвешенные вещества)	0,01–1, мг/м ³	К, М, С	3	0,5
Альдегиды в пересчете на акролеин (C ₃ H ₄ O),	0,001–0,01	Г, Н, НЯ, НС, О, П. ПО, РС	2–3	0,02
Формальдегид (CH ₂ O)	0,00010–0,0019	О, П, ПО, НС, РС, С	2	0,035
Бенз(а)пирен	0,1–6 мкг/м ³	К, М	1	ПДК _{с.с.} 1·10 ⁻⁶

Примечание: Принятые сокращения обозначают: О – общее токсическое действие; Г – поражение зрительного нерва и сетчатки глаз; К – канцероген; КТ – яды, действующие на кроветворение; КЯ – кровяные яды; М – мутаген; Н – наркотики; НС – поражение нервной системы; НЯ – нервные яды; П – поражение печени; ПО – поражение почек; РС – раздражают слизистые оболочки; С – образование смога; СС – поражение сосудистой системы; У – удушающее действие

Количественные оценки, выполненные международными экспертами, показывают, что ужесточение экологических стандартов, подобное вводимому Евро-7, способно предотвратить десятки тысяч преждевременных смертей за счет снижения воздействия именно этих загрязнителей, а специальные исследования автобусного парка, близкого по характеру эксплуатации к ПА, демонстрируют значительный потенциал для сокращения выбросов [15].

Современные исследования подчеркивают комплексный характер воздействия твердых частиц (PM) от дизельных двигателей на окружающую среду и здоровье человека. Как показано в работе [16], повышенная дымность напрямую коррелирует с выбросами сажи (черного углерода), на поверхности которой адсорбируются токсичные и канцерогенные соединения, включая полициклические ароматические углеводороды. Более того, исследования последних лет свидетельствуют, что даже при использовании топлив с улучшенными экологическими характеристиками сохраняется проблема ультрадисперсных частиц (менее 100 нм), представляющих наибольшую опасность при вдыхании [14]. Это подтверждает актуальность задач не только по контролю общей дымности, но и по анализу дисперсного состава выбросов специальной техники, такой как ПА, эксплуатирующейся в режимах, способствующих интенсивному износу.

Не менее серьезной, но менее очевидной является пожарная опасность, исходящая от современных топливно-кatalитических систем (ТКС). Эффективная работа кatalитических нейтрализаторов и сажевых фильтров сопряжена с необходимостью поддержания высокотемпературных режимов и реализации мощных экзотермических процессов. В условиях реальной эксплуатации, например, при использовании некондиционного топлива или отказах системы управления, ТКС могут перейти в аварийный режим, характеризующийся неконтролируемым ростом температуры до 650–700 °С и выше [13].

Проблема термической нестабильности и теплового разгона в кatalитических нейтрализаторах подробно изучена в международной практике и признается ключевым фактором пожарного риска [17, 18].

Таким образом, дымность ОГ выступает индикатором не только экологического ущерба, но и скрытых технических неисправностей, способных привести к пожарам и значительному материальному ущербу.

В Российской Федерации инструментальный контроль дымности ОГ дизельной техники, включая ПА, регламентирован межгосударственным стандартом ГОСТ 33997–2016 «Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки», который предусматривает измерение на режиме свободного ускорения (СУ). Однако существующая методика имеет существенный конструктивный недостаток – она предполагает ручное управление органом подачи топлива (педалью акселератора) водителем-оператором. Субъективность восприятия временных интервалов и прилагаемого усилия приводит к значительному разбросу результатов измерений, что снижает достоверность оценки как технического состояния автомобиля, так и его реального экологического ущерба [19].

Проблема усугубляется тем, что значительная часть парка ПА в России эксплуатируется за пределами нормативных сроков и не соответствует современным экологическим стандартам, требуя повышенного внимания к объективности контроля [10]. Кроме того, как отмечено в исследованиях по безопасности ТКС, для корректной диагностики состояния кatalитических нейтрализаторов, работа которых определяется сложными физико-химическими процессами в пористом слое (лимитируемых диффузией реагентов), необходимы стабильные и воспроизводимые входные данные, одним из ключевых параметров является дымность ОГ [13]. Низкое качество входных данных «зашумляет» полезный сигнал, маскируя устойчивые тенденции, вызванные деградацией катализатора.

Следовательно, совершенствование методологии оценки негативного воздействия дизельных ПА является комплексной задачей, направленной одновременно на снижение экологического ущерба, предотвращение пожароопасных ситуаций и повышение достоверности технического диагностирования. Целью данного исследования является разработка и апробация методологии повышения объективности экологической оценки дизельных ПА путем внедрения роботизированного манипулятора для автоматизации процесса измерения дымности ОГ на режиме СУ, что позволит получать стабильные данные для последующего анализа и прогнозирования рисков.

Методы исследования

В качестве объектов исследования выступили дизельные ПА модельного ряда АЦ на шасси УРАЛ-5557 и КамАЗ с двигателями ЯМЗ-53623 стандарта Евро-5 и Cummins ISB 6.7 E5, состоящие на вооружении пожарно-спасательных гарнизонов Красноярского края. Выборка включала как новые автомобили с небольшим пробегом, так и автомобили со значительной наработкой, что позволило получить репрезентативные данные о техническом состоянии и уровне экологических выбросов парка ПА.

Основным прибором для контроля дымности ОГ использовался измеритель дымности ОГ «МЕТА-01 МП 0.1». Для контроля параметров работы двигателя (частота

вращения коленчатого вала, температура охлаждающей жидкости, ошибки) применялось программное обеспечение EDCDiags версии 6.03.45.

Ключевым элементом исследования являлось разработанное автоматизированное устройство – роботизированный манипулятор, предназначенный для замены оператора (водителя) при проведении цикла СУ и устранения субъективной погрешности. Конструкция устройства включает:

- программируемый микроконтроллер с Wi-Fi-модулем для дистанционного управления;
- релейный модуль с триггером высокого и низкого уровня;
- двухпозиционный электромагнитный пневматический клапан;
- однорычажный пневматический цилиндр двустороннего действия;
- регулятор давления с манометром.

Алгоритм работы манипулятора, запрограммированный в среде Arduino IDE, обеспечивает строго регламентированное воздействие на педаль акселератора, соответствующее временным требованиям стандартизированной методики: перемещение до упора за 0,9 с, удержание в течение 3 с и возврат в исходное положение. Цикл повторяется 6 раз подряд с паузой между циклами 10 с, что полностью исключает субъективную ошибку оператора, связанную с восприятием временных интервалов и прилагаемого усилия.

Экспериментальные исследования проводились на базе ООО «Краевой УралАвтоЖентр» и учебной пожарно-спасательной части. Перед началом измерений выполнялась подготовка:

- визуальная проверка герметичности системы выпуска и нейтрализации ОГ;
- прогрев двигателя до температуры охлаждающей жидкости 80 °C;
- установка противооткатных упоров и перевод рычага коробки переключения передач в нейтральное положение;
- проверка соответствия окружающих условий: температура воздуха от 0 °C до 35 °C, атмосферное давление от 92 до 105 кПа.

Измерения дымности проводились в два этапа по сравнительной схеме для оценки влияния человеческого фактора:

Этап 1 (Контрольная серия): Замеры по стандартной методике с участием водителя-оператора, который вручную выполнял циклы СУ, ориентируясь на секундомер.

Этап 2 (Основная серия): Замеры с использованием роботизированного манипулятора, который автоматически выполнял идентичные циклы СУ.

Размещение роботизированного манипулятора в кабине ПА осуществлялось над педалью топливоподачи (рис. 1).



а

б

Рис. 1. Размещение роботизированного манипулятора:
а) вид в кабине ПА; б) вид около кабины ПА

Для каждого ПА фиксировались значения дымности (коэффициент поглощения света, м^{-1}), общий пробег, а также регистрировались показания тахометра для последующего анализа динамики развития мощности.

Для оценки стабильности и воспроизводимости результатов измерений применялись методы математической статистики. Для каждой серии замеров рассчитывались следующие показатели: среднее арифметическое значение, размах вариации, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации.

Статистическая значимость различий в стабильности измерений оценивалась путем сравнения коэффициентов вариации. Для установления корреляционной зависимости между дымностью ОГ и общим пробегом ПА применялся метод линейной аппроксимации с расчетом коэффициента детерминации R^2 .

Повышение воспроизводимости и стабильности результатов измерений является критически важным не только для целей текущего контроля, но и для применения современных методов инвентаризации выбросов. Международные методики, такие как ЕМЕР/CORINAIR, реализованные в программном комплексе COPERT, рекомендуются Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК) для наиболее детализированной оценки выбросов (уровень 3) и требуют высококачественных входных данных [20]. Разрабатываемая в данном исследовании методология, основанная на автоматизации измерений, направлена на преодоление одного из ключевых препятствий для применения подобных точных моделей в условиях эксплуатации специальной техники – нестабильности и субъективной погрешности входных параметров.

Таким образом, комплекс применяемых методов, сочетающий стандартизованные инструментальные измерения, оригинальную аппаратную разработку в виде роботизированного манипулятора и статистический анализ данных, позволяет не только оценить эффективность предложенной методологии, но и получить объективную основу для последующего диагностирования технического состояния и прогнозирования экологических рисков.

Теоретические основы диагностирования

Повышенная дымность ОГ, регистрируемая в ходе инструментального контроля, представляет собой не просто эмпирический параметр, а сложную функцию, отражающую глубинные физико-химические процессы, протекающие в двигателе и системе нейтрализации. В общем смысле диагностирование является одним из этапов решения задачи, который следует за определением проблемы и предшествует планированию и реализации решения [21].

Процесс сажеобразования в дизельном двигателе имеет ярко выраженную пространственную неоднородность и напрямую связан со структурой топливного факела. Для наглядного представления физической сути явления на рис. 2 представлена схематическая модель, выделяющая ключевые зоны в поперечном сечении факела [22].

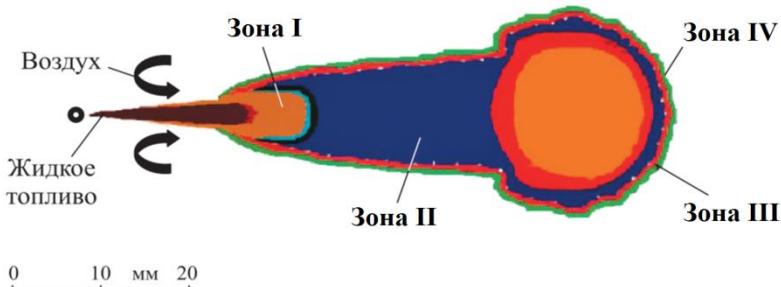


Рис. 2. Схематическое изображение зон сажеобразования в топливном факеле дизельного двигателя:

I – Ядро факела; II – Зона пиролиза и нуклеации сажи;

III – Зона диффузионного пламени (окисления); IV – Зона выгорания сажи

Зона I (Ядро факела): Центральная область, характеризующаяся поступлением распыленного топлива и его начальным прогревом. Концентрация паров топлива максимальна, а содержание окислителя минимально.

Зона II (Предпламеная зона / Зона пиролиза и нуклеации): Область, непосредственно примыкающая к ядру, где под воздействием высоких температур (порядка 1 300–2 000 К) происходит пиролитический распад тяжелых углеводородов с образованием ацетилена и других промежуточных продуктов, являющихся предшественниками (зародышами) частиц сажи. Данная зона характеризуется значительным дефицитом окислителя.

Зона III (Зона диффузионного пламени): Внешняя оболочка факела, где пары топлива, диффундирующие из внутренних зон, смешиваются с воздухом и интенсивно окисляются. Здесь наблюдаются пиковые температуры (до 2 700 К), способствующие термическому образованию оксидов азота (NO_x).

Зона IV (Зона выгорания сажи): Периферийная область, где частицы сажи, сформировавшиеся в Зоне II и попавшие в поток с избытком окислителя и высокой температурой, подвергаются окислению (газификации).

Повышенная дымность ОГ является прямым следствием нарушения баланса между процессами образования сажи в Зоне II и её последующего выгорания в Зоне IV. Такое нарушение может быть вызвано ухудшением распыливания топлива (увеличение массы топлива в Зоне II), снижением температуры в Зоне выгорания или дефицитом кислорода. Таким образом, наблюдаемый параметр дымности интегрирует в себе информацию о состоянии системы смесеобразования и сгорания в целом, что является основой для его использования в диагностических целях. Далее представленные физические принципы формализуются в рамках математической модели.

Для корректной интерпретации результатов измерений и перехода от констатации факта к диагностированию причин необходима опора на теоретические модели, описывающие работу катализитических нейтрализаторов (КН) и сажевых фильтров.

Эффективность работы КН определяется совокупностью одновременно протекающих процессов: газовой динамики потока ОГ, тепло- и массопереноса, а также гетерогенных химических реакций на поверхности катализатора [13]. Математическое моделирование этих процессов позволяет установить связь между наблюдаемыми параметрами (дымность, температура) и состоянием активного слоя катализатора.

Основу моделирования составляет система дифференциальных уравнений материального и энергетического баланса, хорошо зарекомендовавшая себя в задачах моделирования автомобильных катализитических систем [17]. Скорость нейтрализации ключевых компонентов (CO , CH , NO_x) на поверхности катализатора может быть описана кинетическими уравнениями, учитывающими механизм Лэнгмюра-Хиншельвуда. Подобные модели успешно применяются, в частности, для описания кинетики окисления сажи в дизельных сажевых фильтрах [23].

Для реакции окисления оксида углерода, например, скорость может быть выражена уравнением вида [13]:

$$\frac{dc_{\text{CO}}}{dt} = \frac{k_{\text{CO}} \cdot c_{\text{CO}} \cdot (c_{\text{O}_2} + c_{\text{O}_2, \text{s}})}{(1 + K_1 \cdot c_{\text{CO}} + K_2^2 \cdot c_{\text{CH}})^2 \cdot (1 + K_2 \cdot c_{\text{CO}}^2 \cdot c_{\text{CH}}^2) \cdot (1 + K_3 \cdot c_{\text{NO}_x}^{0,7})}, \quad (1)$$

где t – время; k – константа скорости реакции; c – концентрация элемента ОГ; K – постоянная адсорбции.

Данное уравнение иллюстрирует сложность и взаимовлияние протекающих на катализаторе процессов, где скорость окисления одного компонента (CO) зависит от концентраций других (O_2 , CH , NO_x).

Для пористого активного слоя, используемого в современных блочных нейтрализаторах, можно выделить несколько областей протекания реакции в зависимости от соотношения скоростей химического превращения и диффузии реагентов [17, 18]:

Кинетическая область: Скорость процесса лимитируется собственно химической реакцией. Концентрация реагентов по всему объему пор постоянна, и работает вся внутренняя поверхность катализатора.

Внутридиффузационная область: Скорость процесса лимитируется диффузией реагентов в порах катализатора. Реакция протекает в ограниченной зоне у входа в пору, и часть внутренней поверхности не участвует в процессе.

Внешнедиффузационная область: Скорость процесса лимитируется подводом реагентов из ядра потока к внешней поверхности слоя.

Для современных автомобильных КН, как показано в работе [13], процесс в типичных эксплуатационных режимах протекает преимущественно во внутридиффузационной области. Переход работы КН из кинетической в диффузационную область, вызванный, например, блокировкой пор сажей или химическим отравлением соединениями фосфора и серы [21], ведет к резкому падению эффективности нейтрализации и росту дымности ОГ.

Для количественной оценки влияния диффузационных ограничений используется коэффициент эффективности (η), представляющий собой отношение наблюдаемой скорости реакции к скорости в отсутствие диффузационного торможения (то есть в кинетической области). Этот коэффициент связан с модулем Тиле (Ψ), который является критерием подобия, характеризующим отношение скорости химической реакции к скорости диффузии:

$$\eta = \frac{th\psi}{\psi}, \quad (2)$$

где $th\psi$ – гиперболический тангенс модуля Тиле.

$$\psi = \frac{V_c}{S_c} \cdot \sqrt{\frac{k_V}{D_{\text{эфф}}}}, \quad (3)$$

где V_c , S_c – объем и внешняя поверхность КН; k_V – константа скорости реакции, отнесенная к единице общего объема активного слоя канала; $D_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент диффузии.

Анализ модели показывает, что при увеличении модуля Тиле (например, из-за снижения $D_{\text{эфф}}$ при закоксовывании пор) коэффициент эффективности η падает. Согласно [13] в режимах полной нагрузки степень использования пористого материала может составлять менее 1 %, что свидетельствует о глубоком диффузационном торможении.

Получаемые в результате автоматизированных измерений стабильные данные о дымности создают надежную основу для верификации подобных физико-химических моделей. Корректная оценка коэффициента эффективности (η) и диагностика степени деградации КН возможны только при наличии воспроизводимых входных данных, которые исключают «шум», вносимый человеческим фактором. Это согласуется с общими тенденциями развития экологического нормирования, где прослеживается переход к непрерывному мониторингу и более строгим требованиям к долговечности систем нейтрализации, как это предусмотрено в перспективном стандарте Евро-7 [13].

С позиции изложенной теории, повышенная и, что особенно важно, нестабильная дымность, зафиксированная в ходе измерений, является прямым следствием следующих процессов:

– снижение коэффициента эффективности (η) активного слоя катализатора, что приводит к снижению скорости нейтрализации сажи и углеводородов;

– нарушение процессов смесеобразования в двигателе, приводящее к повышенному выходу сажи;

– смещение рабочих точек КН в область высокотемпературных и пожароопасных режимов в попытке компенсировать падение эффективности.

Процессы, описываемые уравнениями (1–3), согласуются с современными многозонными моделями горения, которые учитывают не только кинетику химических реакций, но и интенсивность турбулентного перемешивания [23]. Согласно этим моделям повышенное сажеобразование связано со зонами обогащенной топливовоздушной смеси, где происходит пиролиз тяжелых углеводородов. Стабильные и воспроизводимые данные по дымности, получаемые с помощью роботизированного манипулятора, являются критически важными для верификации таких моделей и корректной оценки коэффициента эффективности (η) КН в условиях его постепенной деградации.

Результаты исследования и их обсуждение

Для количественной оценки эффективности предложенной методологии был проведен сравнительный анализ результатов измерений дымности ОГ на одном и том же ПА АЦ-6,0-40 (5557). Серия из 10 замеров была выполнена по стандартной методике с участием водителя-оператора и еще 10 замеров – с использованием разработанного роботизированного манипулятора. Результаты измерений и расчет ключевых статистических показателей представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные результаты измерений дымности ОГ разными методами

Статистический показатель	Ручной метод (с оператором)	Автоматизированный метод (с манипулятором)
Среднее арифметическое, м^{-1}	0,283	0,288
Размах вариации, м^{-1}	0,19	0,06
Среднеквадратическое отклонение, м^{-1}	0,051	0,020
Коэффициент вариации, %	18,1	6,9

Как видно из табл. 2, средние значения дымности, полученные разными методами, практически совпадают (0,283 и 0,288 м^{-1}), что указывает на отсутствие систематического смещения, вносимого манипулятором. Однако ключевое различие наблюдается в показателях вариации. Размах вариации при использовании манипулятора более чем в три раза ниже, чем при ручном управлении (0,06 м^{-1} против 0,19 м^{-1}). Наиболее объективным показателем является коэффициент вариации, который для методики с манипулятором составил 6,9 %, что более чем в 2,5 раза ниже, чем при работе оператора (18,1 %).

Полученные данные наглядно демонстрируют, что применение роботизированного манипулятора позволяет существенно повысить воспроизводимость и стабильность результатов измерений дымности ОГ. Снижение субъективного фактора исключает значительные выбросы в данных, обусловленные человеческим восприятием временных интервалов и усилия нажатия на педаль. Этот результат имеет фундаментальное значение для последующего диагностирования, основанного на физико-химических моделях.

Высокая вариативность данных, полученных с участием оператора ($V = 18,1 \%$), делает практически невозможным корректное использование этих данных для анализа тонких эффектов, связанных с кинетикой и диффузией в каталитическом нейтрализаторе. Значительный случайный разброс «зашумливает» полезный сигнал, маскируя устойчивые тенденции, вызванные, например, начальной стадией блокировки пор активного слоя сажей или его отравления. Напротив, низкий коэффициент вариации (6,9 %), достигнутый с помощью манипулятора, предоставляет качественно новые диагностические возможности.

Повышенная стабильность данных, полученных с использованием роботизированного манипулятора, позволила с большей достоверностью проанализировать зависимость дымности ОГ от наработки ПА. Для всего парка испытуемых автомобилей была установлена устойчивая положительная корреляция между значением дымности и пробегом. Коэффициент детерминации R^2 для данной зависимости, рассчитанный на основе автоматизированных измерений, составил 0,87, что свидетельствует о сильной статистической связи. Напротив, использование данных, полученных с участием оператора, давало значительно менее определенную картину ($R^2 = 0,52$), что объясняется высоким «шумом» и низкой воспроизводимостью ручного метода.

Полученная устойчивая зависимость дымности от пробега ($R^2 = 0,87$) находит свое объяснение в комплексной деградации системы нейтрализации. Современные исследования показывают, что старение КН связано не только с термическим спеканием активного центра, но и с химическим отравлением, например, соединениями фосфора и серы [18]. Это приводит к блокировке пор и снижению эффективного коэффициента диффузии $D_{\text{эфф}}$, что в соответствии с уравнением (3) ведет к росту модуля Тиле и падению коэффициента эффективности η . Таким образом, предлагаемая методика позволяет получать данные, пригодные не только для констатации факта превышения норматива, но и для анализа глубины деградации катализитической системы.

Обсуждение экологической значимости методологии невозможно без учета состава ОГ. Высокая дымность напрямую коррелирует с повышенными выбросами сажи (твердых частиц PM), на поверхности которых адсорбируются канцерогенные полиароматические углеводороды, в том числе бенз(а)пирен [11]. Таким образом, предлагаемая усовершенствованная методология позволяет более точно идентифицировать автомобили, представляющие наибольшую опасность для здоровья населения и окружающей среды.

С позиции пожарной безопасности стабильные замеры дают основания для более надежного выявления автомобилей, работающих в предаварийных режимах. Как показано в теоретической части, устойчиво высокая дымность является индикатором смещения рабочей точки ТКС в термически опасный режим, связанный с экзотермическими процессами активной регенерации или неполного сгорания топлива в катализаторе, что может привести к его перегреву до температур, превышающих 700 °C, и созданию реальной угрозы возгорания [19]. Снижение погрешности измерений дает возможность точнее диагностировать начало этого процесса.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность применения разработанного роботизированного манипулятора для совершенствования метода диагностирования технических нормативов экологической безопасности дизельных ПА в условиях их реальной эксплуатации по дымности ОГ на режиме свободного ускорения. Важным научно-практическим результатом работы является экспериментальное доказательство существенного повышения точности и воспроизводимости измерений дымности ОГ. Последнее подтверждается снижением коэффициента вариации результатов измерений с 18,1 % (при ручном управлении) до 6,9 % (при использовании манипулятора), что свидетельствует о переходе на качественно новый уровень исследований, с обеспечением требуемого временем, уровня достоверности и объективности контроля дымности на режиме СУ применительно к самым современным конструкциям ПА 4-5 экологических классов.

Научная новизна исследования заключается в разработке комплексного метода, интегрирующего аппаратную платформу (робот-манипулятор), оригинальную методику на базе стандартизированной измерительной процедуры и аналитического аппарата для интерпретации результатов на основе физико-химических моделей кинетики. Впервые для задач диагностирования пожарной техники показана принципиальная возможность использования

стабильных данных о дымности в качестве надежного входного параметра для моделирования процессов в каталитических нейтрализаторах, основанных на теории диффузионных ограничений (модуль Тиле, коэффициент эффективности). Установленная корреляционная зависимость между дымностью и пробегом, интерпретированная через призму снижения коэффициента эффективности катализатора (η), открывает возможности для прогностической оценки экологического состояния парка спецтехники и выявления предаварийных состояний, сопряженных и с пожарным риском.

Расширенная практическая значимость результатов состоит в следующем:

– метод позволяет формировать надежную доказательную базу при проведении контрольных мероприятий и точнее идентифицировать транспортные средства, вносящие наибольший вклад в загрязнение атмосферы опасными веществами, в том числе канцерогенными;

– появляется инструмент для превентивного выявления технических неисправностей топливной аппаратуры и каталитических систем, приводящих к превышению нормативов выбросов и работе на пожароопасных режимах. Объективные данные измерений позволяют точнее диагностировать начало деградации катализатора и оптимизировать процесс технического обслуживания, предотвращая режимы экстремального разогрева ТКС;

– получаемые стабильные данные создают основу для разработки и обучения алгоритмов искусственного интеллекта, способных не просто констатировать факт превышения норматива, но и прогнозировать остаточный ресурс систем нейтрализации и вероятность перехода их в аварийный режим.

Внедрение разработанного метода будет способствовать не только повышению экологической безопасности эксплуатации ПА и снижению пожарных рисков, но и формированию надежной доказательной базы для экологического контроля в соответствии с ужесточающимися требованиями к конструкции двигателя ПА. Получаемые объективные данные могут быть использованы для верификации и калибровки современных моделей расчета выбросов, а также служить основой для разработки систем предиктивного анализа состояния электронно-управляемых систем топливоподачи и нейтрализации, что соответствует общему вектору развития транспортной экологии, задаваемому стандартами Евро-7.

Список источников

1. Impact of Oxygenated Additives on Soot Properties during Diesel Combustion / N. Palazzo [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14. № 1. P. 147–160. DOI: 10.3390/en14010147.
2. Zakharov D., Fadyushin A., Chainikov D. Changes in the environmental sustainability of the urban transport system when introducing paid parking for private vehicles // Resources. 2020. Vol. 9. № 9. P. 90–100. DOI: 10.3390/resources9090100.
3. Донченко В.В., Чижова В.С. Современные подходы к оценке выбросов загрязняющих веществ автомобильным транспортом: состояние, проблемы и пути решения // Научный вестник автомобильного транспорта. 2022. № 1. С. 5–12.
4. Kholod N., Evans M., Kuklinski T. Russia's black carbon emissions: focus on diesel sources // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. Vol. 16. P. 1–27. DOI: 10.5194/acp-2016-475.
5. Ложкина О.В., Мальчиков К.Б. Определение содержания поллютантов в отработавших газах судового двигателя ЯМЗ-238 ГМ2 // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 158–168. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-158-168.
6. 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.
7. Усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов парниковых газов от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта в Российской Федерации / Ю.В. Трофименко [и др.] // Научный вестник Московского государственного технического

университета гражданской авиации. 2025. Т. 28. № 1. С. 78–96. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-78-96.

8. Мальчиков К.Б., Ложкина О.В. Мониторинг и прогнозирование опасного загрязнения воздуха маломерными судами и автотранспортом // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2025. № 1 (80). С. 55–62.

9. Ложкин В.Н., Сацук И.В. Роботизированная диагностика чрезвычайно-опасных режимов эксплуатации двигателей пожарных машин в парадигме интеллектуализации транспортных систем // Технико-технологические проблемы сервиса. 2024. № 4 (70). С. 23–26.

10. Гавкалюк Б.В., Ложкин В.Н. Повышение эффективности агрегатов мобильных средств доставки специализированного оборудования и личного состава для тушения пожаров // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 1 (69). С. 107–113. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-107-113.

11. Ворохобин А.В., Дерканосова Н.М., Манойлина С.З. Повышение экологической безопасности поршневых двигателей внутреннего сгорания // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2023. Т. 16. № 4 (79). С. 93–101. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_4_93.

12. Wardoyo A.Y.P., Juswono U.P., Noor J.A.E. The association between the diesel exhaust particle exposure from bus emission and the tubular epithelial cell deformation of rats // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. P. 23073–23080. DOI: 10.1007/s11356-020-08752-x.

13. Ложкин В.Н. Обеспечение пожарной безопасности сложных электронно-управляемых термокатализических систем: теоретические основы, диагностирование. СПб. : С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2023. 284 с.

14. A systematic literature review on indoor PM2.5 concentrations and personal exposure in urban residential buildings / Yu. Liu [et al.] // Heliyon. 2022. Vol. 8. № 8. Art. e10174. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10174.

15. Донченко В.В., Чижова В.С. Современные тенденции повышения экологической безопасности автотранспортных средств – перспективы внедрения экологического стандарта Евро-7 (по материалам зарубежных источников) // Научный вестник автомобильного транспорта. 2023. № 3. С. 10–20.

16. An Overview of Physical and Chemical Features of Diesel Exhaust Particles / X. Wang [et al.] // Journal of the Energy Institute. 2018. Vol. 92. № 6. P. 1864–1888. DOI: 10.1016/j.joei.2018.11.006.

17. Певнев Н.Г., Залознов А.В. Описание математической модели расчета времени нестационарного процесса нагрева каталитического нейтрализатора отработавших газов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. 2017. № 4-5 (56-57). С. 25–36.

18. Thermal Sintering and Phosphorus Poisoning of a Layered Diesel Oxidation Catalyst / M. Agote [et al.] // Topics in Catalysis. 2022. Vol. 66. P. 777–786. DOI: 10.1007/s11244-022-01752-w.

19. Ложкин В.Н., Сацук И.В. Робототехнический метод контроля аварийных режимов эксплуатации двигателей пожарных машин // Мир транспорта и технологических машин. 2024. № 2-2 (85). С. 91–97. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-91-97.

20. Актуализация оценок выбросов парниковых газов от автомобильного транспорта в Национальном кадастре за 2010–2021 гг. / В.М. Лытов [и др.] // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2024. Т. 35. № 1-2. С. 101–123. DOI 10.21513/0207-2564-2024-1-2-101-123.

21. Кулешов А.С., Фадеев Ю.М., Кулешов А.А. Развитие многозонных моделей для расчета сгорания в современных ДВС // Двигателестроение. 2017. № 2 (268). С. 7–10.

22. Vera-Tudela W. An Experimental Study of a Very High-Pressure Diesel Injector (Up to 5000 Bar) by Means of Optical Diagnostics / W. Vera-Tudela [et al.] // Fuel. 2020. Vol. 275. P. 117933. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117933.

23. 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.

References

1. Impact of Oxygenated Additives on Soot Properties during Diesel Combustion / N. Palazzo [et al.] // Energies. 2021. Vol. 14. № 1. P. 147–160. DOI: 10.3390/en14010147.
2. Zakharov D., Fadyushin A., Chainikov D. Changes in the environmental sustainability of the urban transport system when introducing paid parking for private vehicles // Resources. 2020. Vol. 9. № 9. P. 90–100. DOI: 10.3390/resources9090100.
3. Donchenko V.V., Chizhova V.S. Sovremennye podhody k ocenke vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv avtomobil'nym transportom: sostoyanie, problemy i puti resheniya // Nauchnyj vestnik avtomobil'nogo transporta. 2022. № 1. S. 5–12.
4. Kholod N., Evans M., Kuklinski T. Russia's black carbon emissions: focus on diesel sources // Atmospheric Chemistry and Physics. 2016. Vol. 16. P. 1–27. DOI: 10.5194/acp-2016-475.
5. Lozhkina O.V., Mal'chikov K.B. Opredelenie soderzhaniya pollyutantov v otrabotavshih gazah sudovogo dvigatelya YAMZ-238 GM2 // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 3 (67). S. 158–168. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-3-158-168.
6. Lozhkina O.V., Mal'chikov K.B. Cravnitel'nyj analiz probegovyh vybrosov avtomobilej na razlichnyh vidah topliva pri dorozhnyh zatorah // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2024. № 2 (103). S. 133–143. DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-2-133-143.
7. Usovershenstvovannaya metodika raschetnogo monitoringa vybrosov parnikovyh gazov ot deyatel'nosti avtomobil'nogo i vnedorozhnogo transporta v Rossijskoj Federacii / Yu.V. Trofimenko [i dr.] // Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoy aviacii. 2025. T. 28. № 1. S. 78–96. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-78-96.
8. Mal'chikov K.B., Lozhkina O.V. Monitoring i prognozirovanie opasnogo zagryazneniya vozduha malomernymi sudami i avtotransportom // Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI). 2025. № 1 (80). S. 55–62.
9. Lozhkin V.N., Sacuk I.V. Robotizirovannaya diagnostika chrezvychajno-opasnyh rezhimov ekspluatacii dvigatelej pozharnyh mashin v paradigme intellektualizacii transportnyh sistem // Tekhniko-tehnologicheskie problemy servisa. 2024. № 4 (70). S. 23–26.
10. Gavkalyuk B.V., Lozhkin V.N. Povyshenie effektivnosti agregatov mobil'nyh sredstv dostavki specializirovannogo oborudovaniya i lichnogo sostava dlya tusheniya pozarov // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2024. № 1 (69). S. 107–113. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-107-113.
11. Vorohobin A.V., Derkanosova N.M., Manojlina S.Z. Povyshenie ekologicheskoy bezopasnosti porshnevyh dvigatelej vnutrennego sgoraniya // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2023. T. 16. № 4 (79). S. 93–101. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2023_4_93.
12. Wardoyo A.Y.P., Juswono U.P., Noor J.A.E. The association between the diesel exhaust particle exposure from bus emission and the tubular epithelial cell deformation of rats // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. P. 23073–23080. DOI: 10.1007/s11356-020-08752-x.
13. Lozhkin V.N. Obespechenie pozharnoj bezopasnosti slozhnyh elektronno-upravlyayemyh termokataliticheskikh sistem: teoreticheskie osnovy, diagnostirovanie. SPb. : S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2023. 284 s.
14. A systematic literature review on indoor PM2.5 concentrations and personal exposure in urban residential buildings / Yu. Liu [et al.] // Heliyon. 2022. Vol. 8. № 8. Art. e10174. DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e10174.

15. Donchenko V.V., Chizhova V.S. Sovremennye tendencii povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti avtovozrozhnyh sredstv – perspektivy vnedreniya ekologicheskogo standarta Evro-7 (po materialam zarubezhnyh istochnikov) // Nauchnyj vestnik avtomobil'nogo transporta. 2023. № 3. S. 10–20.
16. An Overview of Physical and Chemical Features of Diesel Exhaust Particles / X. Wang [et al.] // Journal of the Energy Institute. 2018. Vol. 92. № 6. P. 1864–1888. DOI: 10.1016/j.joei.2018.11.006.
17. Pevnev N.G., Zaloznov A.V. Opisanie matematicheskoy modeli rascheta vremeni nestacionarnogo processa nagрева kataliticheskogo nejtralizatora otrabotavshih gazov // Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta. 2017. № 4-5 (56-57). S. 25–36.
18. Thermal Sintering and Phosphorus Poisoning of a Layered Diesel Oxidation Catalyst / M. Agote [et al.] // Topics in Catalysis. 2022. Vol. 66. P. 777–786. DOI: 10.1007/s11244-022-01752-w.
19. Lozhkin V.N., Sacuk I.V. Robototekhnicheskij metod kontrolya avarijnyh rezhimov ekspluatacii dvigatelej pozharnyh mashin // Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin. 2024. № 2-2 (85). S. 91–97. DOI: 10.33979/2073-7432-2024-2-2(85)-91-97.
20. Aktualizaciya ocenok vybrosov parnikovyh gazov ot avtomobil'nogo transporta v Nacional'nom kadastro za 2010–2021 gg. / V.M. Lytov [i dr.] // Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem. 2024. T. 35. № 1-2. S. 101–123. DOI 10.21513/0207-2564-2024-1-2-101-123.
21. Kuleshov A.S., Fadeev Yu.M., Kuleshov A.A. Razvitie mnogozonnyh modelej dlya rascheta sgoraniya v sovremennoy DVS // Dvigatelestroenie. 2017. № 2 (268). S. 7–10.
22. Vera-Tudela W. An Experimental Study of a Very High-Pressure Diesel Injector (Up to 5000 Bar) by Means of Optical Diagnostics / W. Vera-Tudela [et al.] // Fuel. 2020. Vol. 275. P. 117933. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117933.
23. 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.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 20.10.2025; одобрена после рецензирования: 28.10.2025;
принята к публикации: 15.11.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 20.10.2025; approved after review: 28.10.2025;
accepted for publication: 15.11.2025

Информация об авторах:

Ложкин Владимир Николаевич, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: vnlojkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6381-0519>, SPIN-код: 9496-2451

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

Information about the authors:

Lozhkin Vladimir N., professor of the department of fire and emergency rescue equipment and automotive facilities of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: vnlojkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6381-0519>, SPIN: 9496-2451

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