

Научная статья
УДК 656.1:628.517.2:614.841.43
doi:10.34987/vestnik.sibpsa.2025.71.92.009

Инструментальный метод контроля безопасности силовых установок пожарных автомобилей по дымности отработавших газов

Иван Владимирович Сацук

Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Железногорск, Россия
<https://orcid.org/0009-0000-9465-6278>

Автор, ответственный за переписку: Иван Владимирович Сацук, Kviteren@gmail.com

Аннотация. В статье представлен разработанный инструментальный метод контроля технического состояния силовых установок пожарных автомобилей на основе параметра дымности отработавших газов. Метод направлен на обеспечение конструктивной безопасности техники и снижение перерасхода дизельного топлива. Установлен нормативный диапазон дымности для исправных автомобилей ($0,12-0,6 \text{ м}^{-1}$) и выявлена статистически значимая зависимость дымности от пробега ($R^2 = 0,84$). На основе теоретической модели, включающей уравнения кинетики окисления сажи и пересчёта массы несгоревшего топлива, проведена количественная оценка перерасхода. Результаты показывают потенциальную экономию до 64,6 тонн топлива в год для парка из 82 автомобилей. Метод включает применение автоматизированного оборудования для воспроизводимых измерений, анализ режимов свободного ускорения и использование диагностических параметров ЭБУ, таких как время впрыска. Особое внимание уделено расширенному диагностическому циклу «разгон-выбег», который позволяет оценить механические потери в двигателе. Практическая значимость работы заключается в создании технологии, обеспечивающей переход к обслуживанию по фактическому состоянию, что повышает надёжность техники, оптимизирует эксплуатационные расходы и реализует предиктивный подход к техническому обслуживанию парка пожарных автомобилей.

Ключевые слова: пожарные автомобили, дизельные двигатели, дымность отработавших газов, перерасход топлива, конструктивная безопасность, инструментальный контроль

Для цитирования: Сацук И.В. Инструментальный метод контроля безопасности силовых установок пожарных автомобилей по дымности отработавших газов // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2025. № 4 (39). С. 151-161.
<https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.71.92.009>.

Original article.

Instrumental method for monitoring the safety of fire truck power units based on exhaust gas smoke opacity

Ivan V. Satsuk

Siberian Fire and Rescue Academy EMERCOM of Russia, Zheleznogorsk, Russia

<https://orcid.org/0009-0000-9465-6278>

Corresponding author: *Ivan V. Satsuk, Kviteren@gmail.com*

Abstract. The article presents an instrumental method developed for monitoring the technical condition of fire truck power units based on the exhaust gas smoke opacity parameter. The method aims to ensure the structural safety of equipment and reduce diesel fuel overconsumption. A normative smoke opacity range for serviceable vehicles ($0.12\text{--}0.6\text{ m}^{-1}$) has been established, and a statistically significant dependence of smoke opacity on mileage ($R^2 = 0.84$) has been identified. Based on a theoretical model, which includes equations for soot oxidation kinetics and the conversion of unburned fuel mass, a quantitative assessment of overconsumption was performed. The results indicate potential savings of up to 64.6 tons of fuel per year for a fleet of 82 vehicles. The method involves the use of automated equipment for reproducible measurements, analysis of free acceleration modes, and utilization of diagnostic parameters from the ECU, such as injection timing. Special attention is paid to the extended diagnostic cycle "acceleration-coastdown," which allows estimating mechanical losses in the engine. The practical significance of the work lies in the creation of a technology that enables a transition to condition-based maintenance, improving equipment reliability, optimizing operating costs, and implementing a predictive approach to maintaining the fire truck fleet.

Keywords: fire trucks, diesel engines, exhaust gas smoke opacity, fuel overconsumption, and structural safety, instrumental monitoring

For citation: Satsuk I.V. Instrumental method for monitoring the safety of fire truck power units based on exhaust gas smoke opacity // *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2025. № 4 (39). С. 151-161. (In Russ.) <https://doi.org/10.34987/vestnik.sibpsa.2025.71.92.009>.

Введение

Эффективность функционирования аварийно-спасательных подразделений неразрывно связана с технической готовностью, надежностью и конструктивной безопасностью парка пожарных автомобилей (ПА). Одной из ключевых статей эксплуатационных расходов является потребление дизельного топлива [1]. Специфические режимы работы ПА приводят к интенсивному износу топливной аппаратуры (ТА) и цилиндропоршневой группы (ЦПГ), вызывая перерасход топлива и повышение дымности отработавших газов (ОГ).

Анализ литературных источников показывает, что существующие подходы к нормированию и контролю расхода топлива часто носят усредненный характер и не учитывают реальное техническое состояние каждого конкретного ПА [2; 3]. Сложные аналитические и лабораторные методы [4; 5] неприменимы для оперативного контроля, а эмпирические корреляции [6; 7] не имеют достаточного теоретического обоснования. Настоящее исследование направлено на заполнение этой ниши.

Цель исследования

Разработка и обоснование инструментального метода контроля дымности ОГ как показателя конструктивной безопасности двигателя ПА, коррелирующего с перерасходом дизельного топлива, для внедрения в процесс технического обслуживания.

Теоретическая часть

Физико-химические основы связи дымности ОГ с расходом топлива.

Для глубокого обоснования предлагаемого метода необходимо рассмотреть теоретические аспекты образования сажи и ее связи с эффективностью сгорания топлива.

Образование сажи (углеродистых частиц) в ОГ дизеля является прямым следствием неполного сгорания топлива в условиях пиролиза и недостатка окислителя в зоне горения [5; 8]. Это происходит при нарушении оптимального соотношения «топливо-воздух» ($\lambda < 1$), некачественном распыливании топлива форсунками или недостаточной температуре в камере сгорания. Все эти факторы являются симптомами износа или неисправности ТА и ЦПГ и напрямую ведут к увеличению удельного расхода топлива для достижения той же выходной мощности.

Количественно связь между образованием сажи и расходом топлива можно описать в рамках кинетики процесса окисления. Для углубленного понимания связи между составом ОГ и расходом топлива, в нашем исследовании используется упрощенная кинетическая модель процесса окисления сажи, основанная на уравнении Аррениуса [9]:

$$K_{oc} = z_k \cdot \exp(-E/RT), \quad (1)$$

где, K_{oc} – константа скорости реакции окисления сажи;

z_k – предэкспоненциальный множитель;

E – энергия активации;

R – газовая постоянная;

T – абсолютная температура;

Повышенная дымность (k , m^{-1}), регистрируемая дымомером, свидетельствует о росте концентрации сажи ($C_{сажи}$) в ОГ. Количество образующейся сажи прямо пропорционально количеству неполностью сгоревшего топлива. При низкой температуре в системе выпуска (менее 300°C) эффективность дожигания сажи падает (K_{oc} снижается согласно уравнению (1)), что способствует росту дымности и указывает на неоптимальный режим работы двигателя, ведущий к перерасходу топлива, снижению конструктивной безопасности и возможности потери работоспособности.

Следует также учитывать проблему неравномерности подачи топлива по цилиндрам, детально исследованную в [10]. Авторы показали, что увеличение неравномерности подачи топлива приводит к ухудшению основных показателей двигателя: снижению эффективной мощности и увеличению удельного эффективного расхода топлива. Этот вывод имеет фундаментальное значение для нашего метода, так как повышенная дымность зачастую является внешним проявлением именно неравномерной работы цилиндров, вызванной износом ТА.

Для перехода от измеряемой дымности k (m^{-1}) к массовому расходу сажи $G_{сажи}$ ($г/ч$) можно использовать упрощенное соотношение, основанное на законе Бугера-Ламберта-Бера и данных о объемном расходе ОГ [9]:

$$G_{сажи} = k \cdot K_{п} \cdot Q_{ог}, \quad (2)$$

где, $K_{п}$ – эмпирический коэффициент пересчета, зависящий от размера и природы частиц;

$Q_{ог}$ – объемный расход ОГ, $m^3/ч$.

Для количественной оценки перерасхода топлива необходимо установить связь между массой несгоревшего топлива и массой образовавшейся сажи. Исходя из элементного состава дизельного топлива и сажи, можно принять, что масса несгоревшего топлива ($G_{т.п}$), соответствующая измеренной массе сажи, составляет [9]:

$$G_{(т.п)} = G_{сажи}/K_{тс}, \quad (3)$$

где, $K_{тс}$ – коэффициент пересчета "топливо-сажа", учитывающий долю углерода в топливе и саже (для стандартного дизельного топлива $K_{тс} \approx 0,15-0,25$).

Важным аспектом является формализация зависимости дымности от параметров топливоподачи. Согласно исследованиям, представленным в источнике [11], ключевым параметром, влияющим на дымность ОГ, является время впрыска топлива ($\tau_{вир}$), которое контролируется электронным блоком управления (ЭБУ) и может быть считано через диагностический разъем OBD2. Анализ моделей сажеобразования [11; 12] показывает, что для

задач непрерывного контроля технического состояния дизельных двигателей может быть использована упрощенная модель, связывающая дымность (k) с временем впрыска ($\tau_{\text{вир}}$):

$$k = f(\tau_{\text{вир}}) \quad (4)$$

Экспериментальные исследования [11] позволили получить линейные аналитические зависимости для рабочего диапазона (например, при $2,5 \leq \tau_{\text{вир}} \leq 3,84$ мс):

$$k = -1,72 \tau_{\text{вир}} + 6,46 \quad (5)$$

Данные зависимости, обладающие высоким коэффициентом детерминации ($R^2 \geq 0,9$) [11], подтверждают принципиальную возможность оценки дымности и, следовательно, косвенно расхода топлива по $\tau_{\text{вир}}$.

Перспективным развитием метода является комплексный анализ режимов «разгона» и «выбега». Динамика «разгона» характеризует способность двигателя развивать мощность, преодолевая инерцию вращающихся масс. Динамика «выбега» (снижение частоты вращения коленчатого вала после сброса нагрузки до холостого хода) характеризует механические потери в двигателе. Сопоставление этих двух фаз, особенно при использовании роботизированного манипулятора, обеспечивающего идентичность условий, позволяет получить уникальную диагностическую информацию. Анализируя скорость снижения частоты вращения на выбеге, можно рассчитать мощность механических потерь. Это, в свою очередь, позволяет верифицировать расчетные значения инерционной мощности, полученные по авторской методике, и более точно дифференцировать причины падения мощности и роста расхода топлива: вызваны ли они неисправностями в системе топливоподачи или повышенными механическими потерями в ЦПГ и кривошипно-шатунном механизме [13].

Таким образом, теоретический анализ подтверждает, что дымность ОГ является комплексным диагностическим параметром, интегрирующим в себе информацию о качестве процесса сгорания, исправности ТА и ЦПГ и, как следствие, об экономичности двигателя. Расширение диагностического цикла за счет фазы «выбега» углубляет диагностику, добавляя оценку механических потерь. Это обосновывает использование инструментального контроля дымности в комплексе с анализом динамических режимов в качестве ядра разрабатываемого ресурсосберегающего метода.

Методы исследования

Для достижения поставленной цели и решения задач в работе применялся комплекс теоретических и экспериментальных методов исследования [14; 15].

Исследование проводилось на парке основных и специальных пожарных автомобилей пожарно-спасательных гарнизонов Красноярского края экологических классов Евро-4 и Евро-5. Основной фокус был направлен на дизельные автоцистерны (АЦ), составляющие более 90% парка для этих экологических классов. Ключевыми моделями для детального анализа послужили АЦ на шасси УРАЛ-5557 с двигателем ЯМЗ-53623 и АЦ на шасси КамАЗ с двигателями Cummins серии ISB и КамАЗ 740.10.

Для проведения инструментальных замеров использовался следующий комплекс оборудования:

- измеритель дымности ОГ (дымомер) «МЕТА-01 МП 0.1». Прибор использовался для измерения коэффициента поглощения светового потока (дымности, k , м^{-1}) на режиме свободного ускорения (СУ) в соответствии с требованиями межгосударственного стандарта ГОСТ 33997-2016 [16].

- автоматизированное устройство скоростного режима дизеля. Для исключения субъективного фактора и обеспечения стабильности условий проведения испытаний применялось разработанное авторское устройство [17], обеспечивающее дозированное и воспроизводимое воздействие на педаль акселератора. Устройство представляло собой программируемый пневмомеханический комплекс, формирующий шесть стандартизированных циклов СУ.

- диагностическое программное обеспечение. Для считывания данных с электронных блоков управления (ЭБУ) двигателей использовалось ПО EDCDiags, а также штатные средства диагностики производителей. Это позволило регистрировать параметры, в частности время впрыска топлива ($\tau_{вир}$), для сопоставления с моделью (5) и дальнейшего анализа.

Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенного инструментального обследования парка пожарных автомобилей Красноярского края был получен массив данных, включающий результаты 40 замеров дымности ОГ на режиме свободного ускорения для ПА экологических классов Евро-4 и Евро-5 (Рис.1).

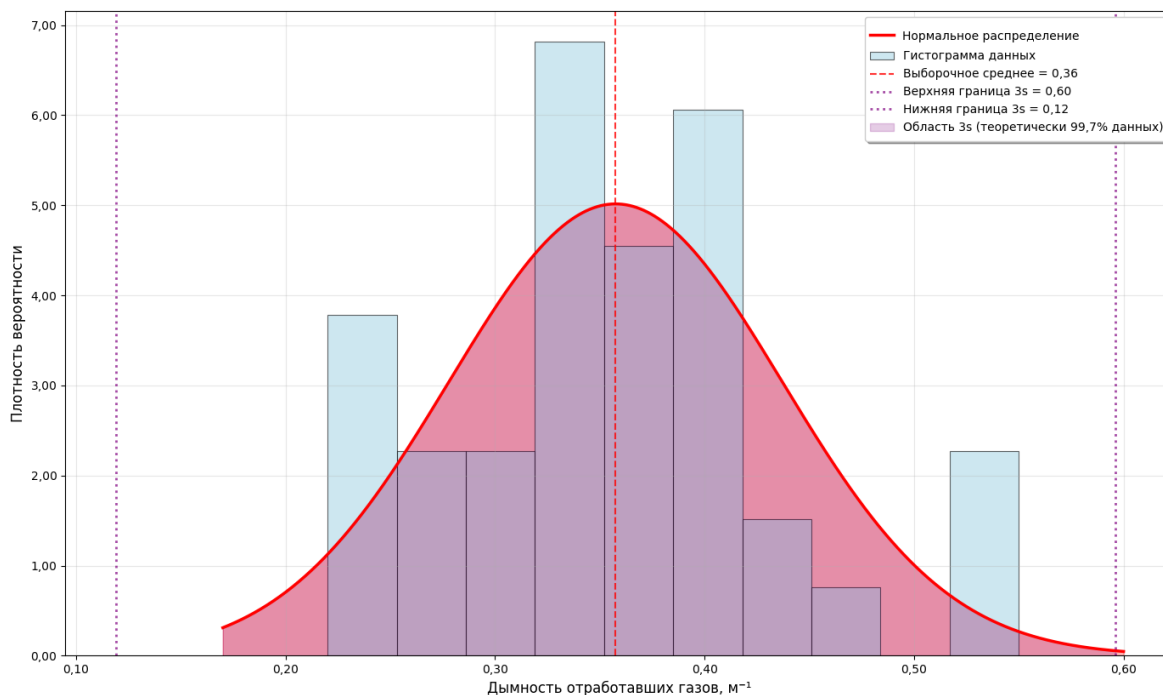


Рис.1. Плотность нормального распределения вероятности дымности ОГ дизелей ПА стандартов Евро-4 и Евро-5 в режиме СУ

Установлено, что данные группируются вокруг среднего значения без выраженных асимметрий, что типично для нормального распределения при этом типичный уровень дымности ОГ лежит в диапазоне от 0,12 до 0,6 м⁻¹, что соответствует интервалу $\bar{k} \pm 3\sigma$. Данный диапазон может рассматриваться как оперативная норма для проведения превентивного диагностирования.

Для выявления зависимости дымности от степени износа силовой установки и возможные области перерасхода топлива была проанализирована связь показателя k с общим пробегом ПА ($S_{общ}$). Аппроксимация данных выявила четкую линейную зависимость (Рис.2).

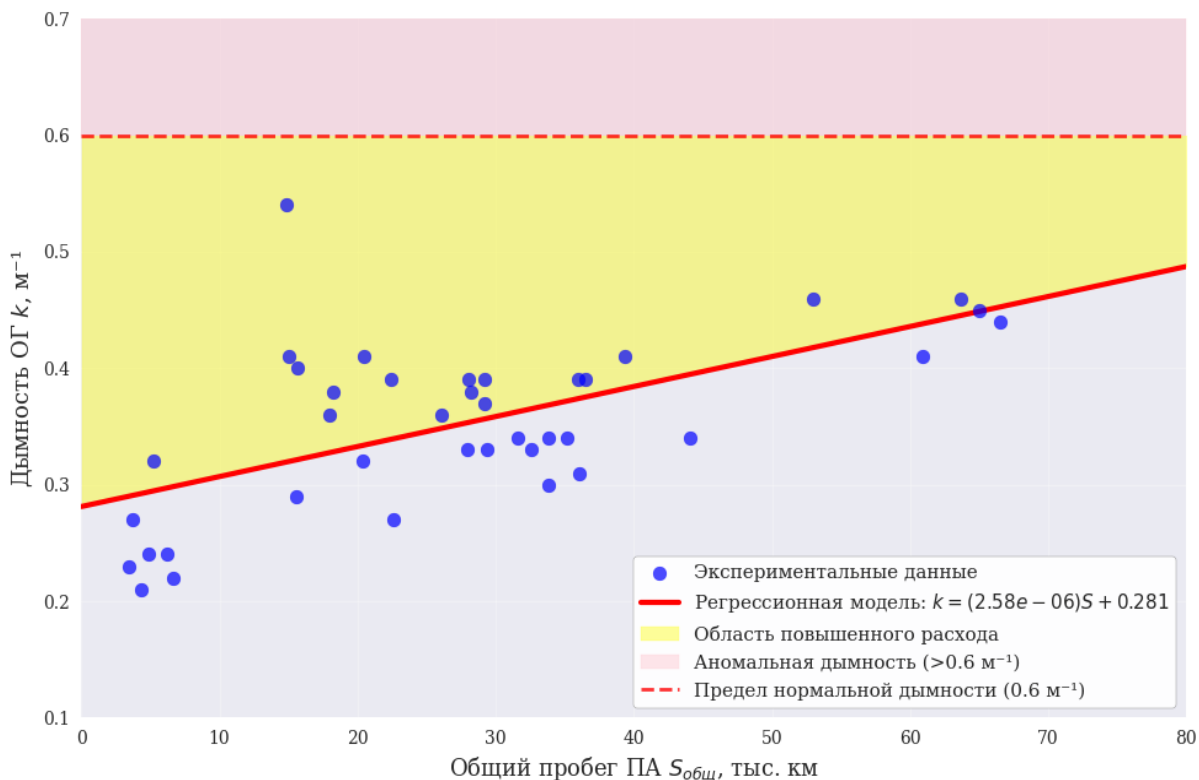


Рис.2. Регрессионная модель зависимости дымности ОГ от пробега ПА

Коэффициент детерминации R^2 для данной модели составил 0,84, что указывает на сильную статистическую связь. Полученная зависимость позволяет рассчитать ожидаемую (эталонную) дымность для конкретного ПА в зависимости от его наработки. Превышение фактически измеренного значения k свыше $0,6 \text{ м}^{-1}$ может являться диагностическим признаком неисправного технического состояния, не связанного с естественным износом.

На основе теоретической модели, представленной уравнениями (2) и (3), проведена оценка возможного перерасхода топлива. Для ПА с двигателем ЯМЗ-53623 при номинальной мощности 220 кВт и объемном расходе ОГ $\approx 800 \text{ м}^3/\text{ч}$, увеличение дымности с $0,6 \text{ м}^{-1}$ (предел нормы) до $1,2 \text{ м}^{-1}$ (типичное значение для неисправного двигателя) соответствует дополнительному расходу топлива примерно 1,8-3,0 кг/ч. При среднегодовой наработке пожарного автомобиля 750 моточасов это составляет 1350-2250 кг дизельного топлива в год на один автомобиль.

Сопоставление данных времени впрыска ($\tau_{\text{впр}}$) с измеренной дымностью показало хорошую сходимость с моделью (5) в рабочем диапазоне для части исследованных автомобилей, что подтверждает применимость упрощенных формализованных зависимостей для экспресс-диагностики.

Результаты испытаний дизельного двигателя Камаз-740.10 показали возможность использования методики для определения фиксированных оптимальных значений регулировочных параметров топливоподачи, полученных при проведении исследований на максимальных оборотах, с построением монограммы (Рис.3).

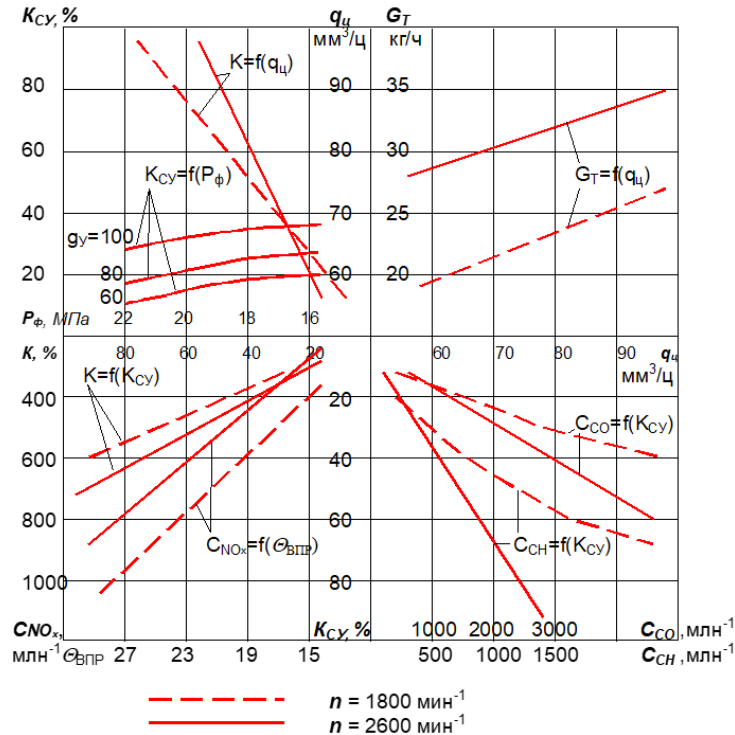


Рис.3. Диаграмма диагностирования технических параметров силовой установки КамАЗ 740.10

где, $q_{ц}$ – цикловая подача топлива, г/цикл·л;
 G_T – часовой расход топлива, кг/ч;
 g_e – удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч;
 N_e – эффективная мощность двигателя, кВт;
 $C_{C_xH_y}$, C_{NO_x} , C_{CO} – концентрация в ОГ углеводородов, окислов азота, оксида углерода, млн⁻¹;
 C_{CO_2} – концентрация в ОГ диоксида углерода, %;
 P_{ϕ} – установочное давление впрыска топлива, МПа;
 $\Theta_{впр}$ – установочный угол опережения впрыска топлива, град положения коленчатого вала до верхней мертвой точки;
 K_{cy} – дымность ОГ, %.

Предварительные результаты, полученные на Этапе 3, подтвердили принципиальную возможность использования фазы «выбега» для оценки механических потерь. Зарегистрированные осциллограммы изменения частоты вращения коленчатого вала во времени в ходе «выбега» позволяют рассчитать замедление вала, которое напрямую связано с моментом сил трения. Это открывает путь для экспериментального определения мощности, теряемой на преодоление механических сопротивлений, и создания уточненной математической модели, связывающей динамические характеристики двигателя с его техническим состоянием и расходом топлива.

Полученные результаты согласуются с данными других исследователей о существовании корреляции между дымностью ОГ и расходом топлива [6; 7]. Однако данное исследование предлагает конкретный инструментарий и формализованные критерии (диапазон типичной дымности, регрессионная модель зависимости от пробега), позволяющие перейти от теоретических положений к практической технологии контроля ресурсопотребления.

Выявленная зависимость (Рис.2) является основой для предиктивной аналитики. Она позволяет не только констатировать факт перерасхода, но и прогнозировать его возникновение по мере увеличения пробега, планируя регулировочные работы

в оптимальные сроки, что соответствует принципам управления техническим состоянием, рассмотренным в работе [18].

А полученные зависимости регулировочных характеристик двигателя и состава ОГ (Рис.3) позволят определять оптимальные значения регулировочных параметров топливоподачи.

Количественная оценка перерасхода топлива на основе теоретической модели демонстрирует значительный экономический потенциал предлагаемого метода. Для парка из 82 ПА предотвращение перерасхода может обеспечить экономию до 64,6 тонн дизельного топлива в год, что в денежном выражении составляет 5,6 млн руб. (при средней стоимости 74 руб. за литр дизельного топлива).

Важным условием для реализации предиктивного подхода является высокая стабильность и воспроизводимость измерений. В нашем исследовании это было достигнуто за счет автоматизации процесса замера дымности сопоставимой по точности со стендовыми диагностическими методами, но при этом значительно более оперативной и дешевой, что свидетельствует о высокой применимости ускоренных методов диагностики и подтверждает их эффективность.

Использование параметра $t_{\text{вир}}$, доступного через OBD2, в сочетании с моделью типа (5) открывает возможность для создания системы непрерывного мониторинга дымности и косвенно расхода топлива в реальном времени без установки дополнительных датчиков, как это предложено в [11].

Предложенное развитие метода за счет анализа фазы «выбега» представляет собой качественный скачок в диагностике. Оно позволяет выйти за рамки контроля лишь системы топливоподачи и оценить состояние механической части двигателя (ЦПГ, подшипники), что является частой, но трудно диагностируемой причиной перерасхода топлива. Комплексный подход, включающий статистический анализ, создание регрессионных моделей, применение автоматизированного оборудования, алгоритм интерпретации результатов и перспективный анализ «разгон-выбег», формирует законченную и развивающуюся ресурсосберегающую технологию для эксплуатации парков ПА. Внедрение данной методики позволяет перейти от политики плановых ремонтов к обслуживанию по фактическому состоянию, что напрямую способствует снижению непроизводительных затрат на топливо.

Заключение

Проведенное исследование позволило разработать и научно обосновать инструментальный метод, направленный на решение задачи ресурсо- и энергосбережения при эксплуатации парков пожарных автомобилей. По результатам проведенного исследования можно выделить главные достигнутые результаты и выводы по ним.

1. На основе анализа физико-химических моделей установлена теоретическая взаимосвязь между дымностью ОГ, полнотой сгорания дизельного топлива и его удельным расходом. Разработана модель для количественной оценки перерасхода топлива по показаниям дымности.

2. Установлены и статистически подтверждены диагностические критерии технического состояния силовых установок пожарных автомобилей. Определен диапазон типичных значений дымности ОГ ($0,12 - 0,6 \text{ м}^{-1}$) для исправных ПА экологических классов Евро-4 и Евро-5.

3. Разработана и апробирована регрессионная модель зависимости дымности ОГ от общего пробега пожарного автомобиля, позволяющая осуществлять предиктивную оценку технического состояния и выявлять перерасход топлива, не связанный с естественным износом.

4. Проведена количественная оценка возможного перерасхода топлива при превышении нормативных значений дымности, показавшая значительный экономический потенциал предлагаемого метода.

5. Обоснована и экспериментально апробирована концепция расширенного диагностического цикла «разгон-выбег». Экспериментально показана принципиальная возможность использования данного подхода для определения инерционной мощности и оценки механических потерь в двигателе, что открывает перспективное направление для углубленной диагностики и верификации расчетных методов.

Перспективные направления дальнейших исследований связаны с доработкой и валидацией методики анализа режима «выбега» для различных моделей двигателей ПА, углублением теоретической базы за счет создания математических моделей, связывающих динамику «разгона-выбега» с мощностными и экономическими показателями, и созданием программного обеспечения для автоматизированного сбора данных, расчета инерционной мощности и формирования диагностических карт.

Список источников

1. Огороднов С.М. Оценка возможности использования аналитических методов при исследовании топливной экономичности автомобилей / С.М. Огороднов, А.Н. Тихомиров, С. И. Малеев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 2 (659). – С. 53–62.
2. Кадухин А.И. Обоснование факторов, определяющих топливную экономичность МТА / А. И. Кадухин // Аграрный научный журнал. – 2015. – № 10. – С. 37–38.
3. Комаров В.В. Нормирование расхода топлива автомобильным транспортом в условиях неустойчивых транспортных потоков / В.В. Комаров, Ф.В. Туровский, А.М. Бакалейник // Автомобильная промышленность. – 2013. – № 8. – С. 26–30.
4. Гусаков С.В. Расчетные исследования автомобильного двигателя на режимах испытательных циклов / С.В. Гусаков, В.А. Марков, М. Ахмадния // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 1 (670). – С. 57–64.
5. Сажеобразование в ДВС (по материалам конгресса СИМАС) // Двигателестроение. – 2021. – № 3 (285). – С. 39–46.
6. Wang X. An Overview of Physical and Chemical Features of Diesel Exhaust Particles / X. Wang, Y. Wang, Y. Bai, P. Wang, Y. Zhao // Journal of the Energy Institute. – 2018. – Vol. 92, No. 6. – P. 1864–1888. – DOI: 10.1016/j.joei.2018.11.006.
7. Li Z. A novel remote condition monitoring and fault diagnosis system for marine diesel engines based on the compressive sensing technology / Z. Li, X. Yan, C. Sheng // Journal of Vibroengineering. – 2014. – Vol. 16, No. 2. – P. 879–890.
8. Palazzo N. Impact of Oxygenated Additives on Soot Properties during Diesel Combustion / N. Palazzo, L. Zigan, F. J. T. Huber, S. Will // Energies. – 2021. – Vol. 14, No. 1. – P. 147–160. – DOI: 10.3390/en14010147.
9. Ложкин В.Н. Обеспечение пожарной безопасности сложных электронно-управляемых термokatалитических систем: теоретические основы, диагностирование / В.Н. Ложкин. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023. – 284 с. – ISBN 978-5-907724-41-9.
10. Девянина А.С. Оценка влияния неравномерности подачи топлива на показатели дизеля / А.С. Девянина // Тракторы и сельхозмашины. – 2017. – № 5. – С. 5–10.
11. Граевский, И.С. Обоснование возможности непрерывного контроля дымности отработавших газов автомобилей с дизельным двигателем экологического класса не выше третьего / И. С. Граевский // Транспортное дело России. – 2024. – № 3. – С. 181–185.
12. Hiroyasu H., Kadota T., Arai M. Development and Use of a spray combustion Model to predict Diesel Engine efficiency Pollutant Emissions. Part 1 Combustion Modelling // Bull JSME. – 1983. – Vol.26, No214. – P. 569-575.
13. Гавкалюк Б.В. Диагностика мобильных средств пожарной охраны с помощью робота-манипулятора динамического нагружения двигателя / Б.В. Гавкалюк, В.Н. Ложкин //

Проблемы управления рисками в техносфере. – 2025. – № 1. – С. 41–49. – DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-41-49.

14. Michael B.G. Analytic Modeling of Vehicle Fuel Consumption / B.G. Michael, E. Shmerling, A. Kuperman // *Energies*. – 2013. – Vol. 6. – P. 117–127. – DOI: 10.3390/en6010117.

15. Haider R. Development of Optimized Maintenance System for Vehicle Fleet / R. Haider, A. Kakar, S. Khattak [et al.] // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2015. – Vol. 34. – P. 21–27.

16. ГОСТ 33997-2016. Колесные транспортные средства. Требования к безопасности в эксплуатации и методы проверки. – Введ. 2018-02-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 68 с.

17. Пат. 226702 U1 Рос. Федерация. Устройство изменения скоростного режима дизеля при измерении дымности отработавших газов / В.В. Галайко, В.Н. Ложкин, И.В. Сацук; заявитель и патентообладатель В.В. Галайко, В.Н. Ложкин, И.В. Сацук. – № 2024103760; заявл. 15.02.2024; опубл. 18.06.2024.

18. Кузнецов Ю.С. Управление техническим состоянием в системе обеспечения работоспособности пожарных машин / Ю.С. Кузнецов, А.И. Пичугин, В.Д. Волков // *Пожарная безопасность*. – 2016. – № 2. – С. 144–149.

References

1. Ogorodnov S.M., Tikhomirov A.N., Maleev S.I. Evaluation of the Possibility of Using Analytical Methods in the Study of Vehicle Fuel Efficiency. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Mashinostroenie*. 2015. No. 2. P. 53–62.

2. Kadukhin A.I. Substantiation of Factors Determining the Fuel Efficiency of a Machine-Tractor Aggregate. *Agrarnyi Nauchnyi Zhurnal*. 2015. No. 10. P. 37–38.

3. Komarov V.V., Turovskiy F.V., Bakaleinik A.M. Fuel Consumption Rationing for Road Transport in Conditions of Unstable Traffic Flows. *Avtomobil'naya Promyshlennost'*. 2013. No. 8. P. 26–30.

4. Gusakov S.V. Calculation Studies of an Automotive Engine in Test Cycle Modes / S. V. Gusakov, V. A. Markov, M. Ahmadnia // *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. – 2016. – No. 1 (670). – P. 57–64.

5. Soot Formation in Internal Combustion Engines (Based on Materials from the CIMAC Congress). *Dvigatelistroenie*. 2021. No. 3. P. 39–46.

6. Wang X., Wang Y., Bai Y., Wang P., Zhao Y. An Overview of Physical and Chemical Features of Diesel Exhaust Particles. *Journal of the Energy Institute*. 2018. Vol. 92. No. 6. P. 1864–1888.

7. Li Z., Yan X., Sheng C. A novel remote condition monitoring and fault diagnosis system for marine diesel engines based on the compressive sensing technology. *Journal of Vibroengineering*. 2014. Vol. 16. No. 2. P. 879–890.

8. Palazzo N. Impact of Oxygenated Additives on Soot Properties during Diesel Combustion / N. Palazzo, L. Zigan, F. J. T. Huber, S. Will // *Energies*. – 2021. – Vol. 14, No. 1. – P. 147–160. – DOI: 10.3390/en14010147.

9. Lozhkin V.N. Ensuring Fire Safety of Complex Electronically Controlled Thermo-Catalytic Systems: Theoretical Foundations, Diagnostics. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii Universitet GPS MChS Rossii, 2023. 284 p.

10. Devyanina A.S. Evaluation of the Influence of Fuel Injection Irregularity on Diesel Engine Performance. *Traktory i Sel'khoz mashiny*. 2017. No. 5. P. 5–10.

11. Graevsky I.S. Substantiation of the Possibility of Continuous Monitoring of Exhaust Gas Opacity for Vehicles with Diesel Engines of an Environmental Class Not Higher Than the Third. *Transportnoe Delo Rossii*. 2024. No. 3. P. 181–185.

12. Hiroyasu H., Kadota T., Arai M. Development and Use of a Spray Combustion Model to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions. Part 1: Combustion Modelling. *Bulletin of the JSME*. 1983. Vol. 26. No. 214. P. 569–575.

13. Gavkalyuk B.V. Diagnostics of Mobile Firefighting Equipment Using a Dynamic Engine Loading Manipulator Robot / B.V. Gavkalyuk, V.N. Lozhkin // *Risk Management in Technosphere Problems*. – 2025. – No. 1. – P. 41–49. – DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-41-49

14. Michael B.G., Shmerling E., Kuperman A. Analytic Modeling of Vehicle Fuel Consumption. *Energies*. 2013. Vol. 6. P. 117–127. [Electronic resource]. – Access mode: <https://doi.org/10.3390/en6010117>.

15. Haider R., Kakar A., Khattak S. [et al.] Development of Optimized Maintenance System for Vehicle Fleet. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol. 34. P. 21–27.

16. GOST 33997-2016. Wheeled Vehicles. Requirements for Operational Safety and Test Methods. Moscow: Standartinform, 2017. 68 p.

17. Patent 226702 U1 Russian Federation. Device for Changing the Speed Mode of a Diesel Engine When Measuring Exhaust Gas Opacity / Galaiko V.V., Lozhkin V. N., Satsuk I.V.; applicant and patentee Galaiko V.V., Lozhkin V.N., Satsuk I.V. no. 2024103760; declared 15.02.2024; published 18.06.2024.

18. Kuznetsov Yu.S., Pichugin A.I., Volkov V.D. Management of Technical Condition in the System for Ensuring the Operational Readiness of Fire Engines. *Pozharnaya Bezopasnost'*. 2016. No. 2. P. 144-149.

Статья поступила в редакцию 14.11.2025, одобрена после рецензирования 18.12.2025, принята к публикации 20.12.2025.

The article was submitted 14.11.2025, approved after reviewing 18.12.2025, accepted for publication 20.12.2025.