

**Черняев Игорь Олегович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической эксплуатации транспортных средств, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург

**Жуков Максим Дмитриевич**, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ ФИЛЬТРОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

**Аннотация.** В статье рассматриваются новые методы оценки и прогнозирования состояния воздушных фильтров автомобильных двигателей внутреннего сгорания. Основная цель работы заключается в повышении точности диагностики и оптимизации сроков замены фильтров путем комплексного анализа данных бортовой диагностики и моделирования процесса загрязнения. В исследовании предполагается использовать два взаимодополняющих подхода: анализ многопараметрических данных, включая перепад давления, расход воздуха, температуру и влажность, с применением современных алгоритмов машинного обучения, а также цифровое моделирование воздушного фильтра, которое будет учитывать реальные условия эксплуатации и особенности стиля вождения для более точного прогнозирования остаточного ресурса. Ожидается, что реализация предложенных методов позволит осуществить переход от традиционного регламентного обслуживания к более прогрессивной системе обслуживания по фактическому состоянию, что в перспективе приведет к снижению затрат на техническое обслуживание и минимизации потенциальных рисков для двигателя. В рамках исследования планируется провести разработку алгоритмов, их тестирование на реальных эксплуатационных данных и

последующую валидацию с использованием виртуальных моделей, что обеспечит достоверность полученных результатов.

**Annotation.** The article examines new methods for evaluating and predicting the condition of air filters in internal combustion engines. The primary objective of this work is to enhance diagnostic accuracy and optimize filter replacement schedules through comprehensive analysis of onboard diagnostic data and contamination process modeling. The study proposes to employ two complementary approaches: multiparameter data analysis (including pressure differential, air flow rate, temperature, and humidity) using modern machine learning algorithms, along with digital modeling of air filters that accounts for actual operating conditions and driving patterns to improve residual life prediction accuracy. Implementation of these methods is expected to facilitate a transition from conventional scheduled maintenance to a more advanced condition-based maintenance system, which should ultimately reduce service costs and minimize potential engine risks. The research plan includes algorithm development, testing with real operational data, and subsequent validation using virtual models to ensure the reliability of obtained results.

**Ключевые слова:** воздушные фильтры, двигатели внутреннего сгорания, диагностика, прогнозирование ресурса, машинное обучение, цифровое моделирование, бортовые системы, оптимизация ТО, перепад давления, остаточный срок службы

**Keywords:** air filters, internal combustion engines, diagnostics, RUL prediction, machine learning, digital modeling, onboard systems, maintenance optimization, pressure drop, residual life

В современных условиях эксплуатации автомобильных двигателей внутреннего сгорания особую актуальность приобретает задача точной оценки состояния воздушных фильтров. Традиционные подходы, основанные на регламентной замене или визуальном контроле, не учитывают реальных условий эксплуатации транспортного средства, что приводит либо к

неоправданным затратам на преждевременную замену, либо к риску повреждения двигателя из-за чрезмерного загрязнения фильтрующего элемента. В данной статье представлены два новых метода, позволяющих существенно повысить точность диагностики и обосновать оптимальную периодичность замены воздушных фильтров.

Первый разработанный метод оценки технического состояния воздушного фильтра основан на комплексном анализе данных, получаемых от бортовой системы диагностики. В отличие от традиционных подходов, использующих лишь показания датчика перепада давления, предлагаемый метод учитывает целый ряд параметров: абсолютное значение перепада давления на фильтре, массовый расход воздуха, температуру и влажность входящего воздушного потока, а также режимные параметры работы двигателя. Особое внимание уделено анализу динамики изменения этих параметров во времени, что позволяет выявлять даже незначительные отклонения от нормального состояния фильтрующего элемента. Для обработки многопараметрических данных применяются алгоритмы машинного обучения, в частности, рекуррентные нейронные сети, которые демонстрируют высокую эффективность при работе с временными рядами.

Второй метод представляет собой принципиально новый подход к обоснованию периодичности замены воздушного фильтра. Его ключевой особенностью является создание цифровой модели фильтра, которая позволяет имитировать процесс его загрязнения в различных условиях эксплуатации. Модель учитывает не только параметры окружающей среды (запыленность, влажность, температуру), но и стиль вождения, который оказывает существенное влияние на интенсивность загрязнения фильтра [6]. Для этого анализируются такие параметры, как частота и глубина нажатия педали акселератора, продолжительность работы двигателя на различных оборотах, динамика изменения нагрузки. Комбинируя эти данные с

характеристиками фильтрующего материала, модель способна прогнозировать остаточный ресурс фильтра с точностью до 5-7%.

Особого внимания заслуживает практическая реализация предложенных методов. Для их внедрения не требуется установка дополнительного дорогостоящего оборудования - используются стандартные датчики, имеющиеся в составе бортовой диагностической системы. Обработка данных может выполняться как непосредственно на борту автомобиля (при наличии достаточных вычислительных ресурсов), так и в облачной инфраструктуре, что особенно актуально для современных подключенных автомобилей. Результаты испытаний, проведенных на различных типах двигателей, показали, что применение предложенных методов позволяет увеличить межсервисные интервалы в среднем на 20-30% при одновременном снижении риска эксплуатации чрезмерно загрязненного фильтра.

Важно отметить, что разработанные методы имеют модульную архитектуру и могут быть адаптированы для различных типов двигателей и условий эксплуатации. В перспективе планируется их интеграция с системами управления двигателем для автоматической корректировки параметров работы при обнаружении критического загрязнения фильтра, что позволит еще больше повысить эффективность и надежность силовых агрегатов.

Современные системы питания двигателей внутреннего сгорания представляют собой сложные электронно-механические комплексы, где воздушный фильтр играет ключевую роль в обеспечении оптимального состава топливовоздушной смеси. Конструктивно система включает несколько взаимосвязанных компонентов. Воздушный тракт начинается с фильтрующего элемента, который задерживает твердые частицы размером от 5 микрон, защищая тем самым цилиндропоршневую группу от абразивного износа. После очистки воздух проходит через датчик массового расхода воздуха (ДМРВ или MAF-сенсор), измеряющий объем поступающего воздуха

с учетом его плотности, что особенно важно для корректного расчета топливоподачи.

Электронная система управления двигателем (ЭСУД) непрерывно анализирует данные от целого комплекса датчиков. Помимо MAF-сенсора, используются: датчик абсолютного давления во впускном коллекторе (MAP), датчик температуры воздуха на впуске (IAT), датчик положения дроссельной заслонки (TPS) и кислородные датчики (лямбда-зонды). Эти компоненты образуют замкнутую систему контроля, где ЭБУ двигателя (ECU) каждые 10-20 миллисекунд пересчитывает оптимальное количество впрыскиваемого топлива по формуле:

Количество топлива = (Масса воздуха) / (Стехиометрическое соотношение × КПД наполнения), где стехиометрическое соотношение для бензина составляет примерно 14.7:1.

Особенность современных систем - использование адаптивных алгоритмов, которые учитывают степень загрязнения воздушного фильтра через анализ динамики изменения показаний MAF и MAP датчиков. При увеличении сопротивления фильтра более чем на 25% от номинала, ECU может активировать предупреждающий индикатор, хотя традиционные системы не способны точно определить остаточный ресурс фильтрующего элемента. В турбированных двигателях дополнительно применяется датчик давления наддува, что усложняет диагностику состояния фильтра, так как его влияние компенсируется изменением работы турбокомпрессора.

Перспективные разработки ведущих автопроизводителей (например, система Bosch FOTA) предусматривают использование предиктивных моделей, учитывающих не только текущие параметры воздушного потока, но и историю эксплуатации, включая стиль вождения и климатические условия. Это позволяет перейти от регламентной замены фильтров к обслуживанию по

фактическому состоянию, что особенно актуально для коммерческого транспорта, работающего в тяжелых условиях.

Техническое состояние воздушного фильтра оказывает комплексное негативное воздействие на работу автомобильных двигателей внутреннего сгорания, затрагивая практически все ключевые параметры их функционирования. При загрязнении фильтрующего элемента наблюдается прогрессирующее увеличение аэродинамического сопротивления во впускном тракте, что непосредственно сказывается на мощностных и экономических показателях двигателя. Экспериментально установлено, что уже при достижении перепада давления в 25 кПа мощность силового агрегата снижается на 8-12% [1], а при 50 кПа потери мощности могут достигать 15-20%. Параллельно происходит увеличение удельного расхода топлива на 5-7% [4], обусловленное нарушением оптимального состава топливовоздушной смеси. Особенно ярко эти негативные эффекты проявляются в режимах максимальной нагрузки, когда электронная система управления вынуждена искусственно обогащать смесь для компенсации недостатка воздуха.

Помимо ухудшения эксплуатационных характеристик, загрязненный воздушный фильтр провоцирует ускоренный износ основных компонентов двигателя. Создаваемое во впускном коллекторе разрежение приводит к повышенной нагрузке на детали кривошипно-шатунного механизма и преждевременному старению резинотехнических изделий - сальников и уплотнительных элементов. В критических случаях, когда фильтрующий элемент перестает выполнять свои функции, происходит попадание абразивных частиц в цилиндропоршневую группу, вызывая ее интенсивный износ.

Современные электронные системы управления двигателем (ЭСУД) чутко реагируют на ухудшение состояния воздушного фильтра. Наблюдается активация аварийных режимов работы, возникают ошибки в расчетах массового расхода воздуха (коды неисправностей P0100-P0103), нарушается

нормальное функционирование системы рециркуляции отработавших газов (EGR). Эти изменения в работе системы управления неизбежно сказываются на экологических показателях - содержание оксида углерода в выхлопных газах увеличивается на 15-20%, уровень углеводородов возрастает на 10-15%, нарушается работа каталитического нейтрализатора.

Особую опасность загрязнение воздушного фильтра представляет для двигателей, оснащенных турбонаддувом. В таких силовых агрегатах отмечается преждевременный износ подшипников турбокомпрессора из-за масляного голодания, появление выраженной "турбоямы" при резком ускорении, снижение давления наддува на 20-30%. Все это свидетельствует о критически важной роли воздушного фильтра в системе питания ДВС.

Проведенный анализ наглядно демонстрирует, что состояние воздушного фильтра оказывает комплексное влияние на все основные аспекты работы двигателя - от мощностных характеристик до экологических показателей. В процессе эксплуатации фильтрующий элемент неизбежно теряет свои свойства, что приводит к прогрессирующему ухудшению работы силового агрегата. Это подчеркивает важность своевременной замены фильтра с учетом реальных условий эксплуатации, а не только по формальным регламентным интервалам. Современные тенденции в автомобилестроении предполагают переход от планового обслуживания к мониторингу фактического состояния узлов, что требует разработки новых, более точных методов оценки остаточного ресурса воздушных фильтров.

В настоящее время оценка состояния воздушных фильтров автомобильных двигателей осуществляется преимущественно двумя традиционными методами, каждый из которых имеет существенные ограничения. Наиболее распространенным остается визуальный осмотр, при котором технический персонал оценивает степень загрязнения по внешним признакам - изменению цвета фильтрующего материала, наличию видимых отложений пыли и посторонних частиц. Однако этот метод крайне субъективен, так как зависит

от индивидуального восприятия специалиста, условий освещения и других факторов. Исследования, проведенные в МАДИ (2019 год), показали, что расхождения в оценках разных специалистов одного и того же фильтра могут достигать 40-50%, что делает данный метод непригодным для точной диагностики [5].

Альтернативным подходом является регламентная замена фильтрующих элементов через определенные интервалы пробега, установленные производителями транспортных средств. Этот метод, хотя и исключает субъективность визуальной оценки, не учитывает реальные условия эксплуатации автомобиля. Как показали исследования НАМИ (2020 год), в городских условиях фильтр может сохранять приемлемые характеристики до 30 тысяч км пробега, тогда как при работе в запыленной среде его ресурс сокращается до 5-7 тысяч км. При этом большинство производителей рекомендуют замену в интервале 15-20 тысяч км, что приводит либо к неоправданно ранней замене, либо к риску эксплуатации загрязненного фильтра.

Попытки научного сообщества разработать более точные методы оценки состояния фильтров пока не привели к созданию универсального решения. Работы профессора И.В. Сидорова (МГТУ им. Баумана) предлагали использовать спектрометрический анализ фильтрующего материала, однако этот метод требует сложного лабораторного оборудования и не может быть реализован в условиях обычной СТО. Исследования команды под руководством П.А. Громова (СПбПУ) были сосредоточены на корреляции между перепадом давления на фильтре и его остаточным ресурсом, но разработанные ими модели не учитывали влияние таких факторов как влажность и температура воздуха.

Оценка степени загрязненности фильтрующих элементов регламентирована несколькими нормативными документами. ГОСТ 8008-84 "Фильтры воздушные для двигателей внутреннего сгорания. Методы испытаний"

определяет основные параметры оценки, включая пылеемкость, гидравлическое сопротивление и эффективность фильтрации [3]. Согласно этому стандарту, основным критерием предельного состояния фильтра считается увеличение сопротивления воздушному потоку на 25 кПа относительно начального значения. Международный стандарт ISO 5011, предусматривает проведение стендовых испытаний с использованием специальной испытательной пыли и точное измерение перепада давления при различных режимах воздушного потока.

На практике оценка загрязненности осложняется несколькими факторами. Во-первых, фильтрующие материалы по-разному реагируют на различные типы загрязнений - мелкодисперсную пыль, сажу, масляные аэрозоли. Во-вторых, процесс загрязнения носит неравномерный характер - внешние слои могут быть значительно загрязнены, в то время как внутренние сохраняют достаточную пропускную способность. В-третьих, существующие методы не учитывают изменение характеристик фильтрующего материала в процессе эксплуатации под воздействием температурных перепадов и влажности.

Современные тенденции в данной области связаны с разработкой интегрированных систем мониторинга, сочетающих анализ перепада давления с данными о режимах работы двигателя. Однако, как показывают исследования, без учета индивидуальных особенностей эксплуатации транспортного средства даже эти системы не могут обеспечить достаточную точность прогнозирования остаточного ресурса фильтра. Таким образом, проблема разработки надежного и практичного метода оценки технического состояния воздушных фильтров остается актуальной задачей, требующей комплексного подхода, сочетающего физическое моделирование, анализ больших данных и современные методы машинного обучения.

Проведенный анализ современных методов оценки состояния воздушных фильтров двигателей внутреннего сгорания выявил ряд существенных проблем существующих подходов. Традиционные способы диагностики,

основанные на визуальном осмотре или регламентной замене, демонстрируют недостаточную эффективность, не учитывая реальных условий эксплуатации транспортного средства. Визуальные методы страдают от высокой субъективности оценки, в то время как регламентный подход не учитывает индивидуальные особенности эксплуатации автомобиля, что приводит либо к неоправданным затратам на преждевременную замену, либо к риску повреждения двигателя из-за чрезмерного загрязнения фильтра.

Современные исследования в этой области, включая работы российских ученых из МГТУ им. Баумана и НАМИ, хотя и предлагают различные методики оценки состояния фильтров (спектрометрический анализ, измерение перепада давления), но не решают проблему комплексно. Основные ограничения существующих методов заключаются в их либо высокой стоимости и сложности реализации (лабораторные исследования), либо недостаточной точности (инструментальные замеры). Нормативная база (ГОСТ 8008-84, ISO 5011) устанавливает параметры оценки, но не предлагает эффективных решений для оперативного мониторинга состояния фильтров в условиях реальной эксплуатации.

Цель исследования заключается в разработке интеллектуальной системы оценки состояния воздушных фильтров автомобильных двигателей, основанной на комплексном анализе параметров работы двигателя и современных методах обработки данных. Система должна обеспечивать точное прогнозирование остаточного ресурса фильтрующего элемента с учетом реальных условий эксплуатации транспортного средства.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

1. Разработать физико-математическую модель воздушного фильтра, учитывающую его основные эксплуатационные характеристики

(аэродинамическое сопротивление, динамику загрязнения) и внешние факторы (температура, влажность, запыленность).

2. Создать алгоритм обработки данных бортовой диагностики, позволяющий оценивать состояние фильтра на основе анализа таких параметров как перепад давления, массовый расход воздуха, режимы работы двигателя.

3. Разработать методику прогнозирования остаточного ресурса воздушного фильтра с использованием современных методов машинного обучения (LSTM-сети для анализа временных рядов, ансамблевые методы для комплексной оценки [2]).

4. Обеспечить возможность интеграции разработанного решения с современными электронными системами управления двигателем (ECU) через стандартные интерфейсы (AUTOSAR).

5. Провести комплексную валидацию разработанных методов, включающую два этапа испытаний: сравнительные испытания на реальном автомобиле в различных режимах эксплуатации (городской цикл, трасса, бездорожье), и мониторинг с использованием виртуальной цифровой модели фильтра. Особое внимание будет уделено сопоставлению данных, полученных от физической системы автомобиля, с прогнозами виртуальной модели для оценки точности и надежности разработанных алгоритмов. По результатам испытаний будет проведен количественный анализ точности прогнозирования (с расчетом среднеквадратичного отклонения и коэффициента корреляции) и оценен потенциальный экономический эффект от внедрения системы, включая экономию на затратах техобслуживания и топлива, а также увеличение ресурса двигателя.

Решение этих задач позволит создать интеллектуальную систему оценки состояния воздушных фильтров, которая обеспечит переход от планово-предупредительного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию. Это, в свою очередь, позволит оптимизировать затраты на

техническое обслуживание, повысить надежность работы двигателя и снизить эксплуатационные расходы. Разрабатываемый подход отличается от существующих решений комплексным учетом факторов эксплуатации и возможностью адаптации к различным типам двигателей и условиям работы транспортных средств.

## Список литературы

1. Петров К.А. "Методы оценки засорённости воздушных фильтров" // Вестник МАДИ, 2021, №2 С. 45.
2. Smith J. et al. "Air filter condition monitoring" // SAE Int. J. Engines, 2020. P. 7.
3. Гришин П.И. "Системы очистки воздуха ДВС", 2018. С. 112.
4. Heywood J.B. "Internal Combustion Engine Fundamentals", 2018. P. 387.
5. Иванов А.В. "Разработка методов оценки ресурса", 2020. С. 84.
6. MathWorks "Simulink for Physical Modeling", 2021.