

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 629.331
doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-73-86

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ БЕНЗИНОВЫХ ДВС НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

Павел Витальевич Тарабрин ✉

Российский университет дружбы народов, Москва, Россия
aspirant7487@yandex.ru

Аннотация

В статье представлен обзор современных методов диагностики технического состояния бензиновых двигателей внутреннего сгорания на основе анализа состава отработавших газов.

Статья посвящена решению задачи повышения эффективности и точности определения параметров рабочего процесса двигателя при использовании неинвазивных методов контроля. В работе применён метод систематического обзора литературных источников за период 2000–2025 гг. Проведена классификация диагностических подходов по типу измерительной технологии: традиционные газоанализаторы, спектроскопические методы (*FTIR*, *NDIR*), портативные комплексы *PEMS*, on-board сенсорные системы и интеллектуальные алгоритмы на основе машинного обучения.

Научная новизна заключается в обобщении современных направлений развития газоаналитиче-

ской диагностики бензиновых ДВС и выявлении тенденций перехода от периодического контроля к непрерывному мониторингу технического состояния. Результаты анализа показали, что использование спектроскопических и интеллектуальных методов обеспечивает повышение точности определения концентраций компонентов выхлопа и позволяет выявлять неисправности на ранних стадиях. Сделан вывод о необходимости интеграции таких систем с электронными блоками управления и развития отечественных портативных диагностических комплексов.

Ключевые слова: диагностика, анализ, двигатель, *FTIR*-спектроскопия, выбросы, технологии, бортовые системы *OBD-II*, обучение, экологические стандарты.

Ссылка для цитирования:

Тарабрин П.В. Современные методы диагностики технического состояния бензиновых ДВС на основе анализа отработавших газов / П.В. Тарабрин. – 2026. - № 6. – С. 73-86. doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-73-86.

Original article
Open Access Article

MODERN METHODS FOR DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF GASOLINE INTERNAL COMBUSTION ENGINES BASED ON EXHAUST GAS ANALYSIS

Pavel Vitalyevich Tarabrin ✉

RUDN University, Moscow, Russia
aspirant7487@yandex.ru

Abstract

The paper provides a review of modern diagnostic methods for the technical condition of gasoline internal combustion engines based on the analysis of exhaust gas composition.

The paper is devoted to solving the problem of increasing the efficiency and accuracy of determining

the parameters of the engine operation using non-invasive monitoring methods. The paper uses the method of a systematic review of literary sources for the period of 2000–2025. The classification of diagnostic approaches by type of measuring technology is carried out: traditional gas analyzers, spectroscopic meth-

ods (FTIR, NDIR), portable PEMS complexes, on-board sensor systems and intelligent algorithms based on machine learning.

The scientific novelty consists in summarizing modern trends in the development of gas analytical diagnostics of gasoline internal combustion engines and identifying trends in the transition from periodic monitoring to continuous monitoring of technical condition. The results of the analysis show that the use of

Reference for citing:

Tarabrin PV. Modern methods for diagnosing the technical condition of gasoline internal combustion engines based on exhaust gas analysis. *Transport Engineering*. 2026;6:73-86. doi: 10.30987/2782-5957-2026-6-73-86.

Введение

Современные бензиновые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) представляют собой сложные энергоустановки, в которых эффективность работы и экологическая безопасность напрямую зависят от точности управления процессами смесеобразования и сгорания. В условиях ужесточения экологических норм (*EURO 6–7*, *EPA Tier 3*) и необходимости сокращения углеродного следа возрастает значение систем оперативной диагностики технического состояния двигателей.

При этом традиционные методы контроля визуальные, акустические или вибродиагностические не всегда позволяют достоверно оценить качество сгорания и состояние узлов двигателя без разборки.

Одним из наиболее информативных и неинвазивных подходов является анализ состава отработавших газов (ОГ), который отражает реальное протекание химических процессов в камере сгорания и позволяет судить о техническом состоянии систем зажигания, питания и нейтрализации [1-3].

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью повышения точности и оперативности диагностики бензиновых двигателей в условиях ужесточения экологических требований и цифровизации транспортных систем.

Анализ отработавших газов давно используется для экологического контроля, однако в последние годы он приобретает диагностическую направленность. Это связано с развитием новых измерительных технологий – от традиционных пятикомпонентных газоанализаторов до спектроскопических систем *FTIR* (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) и порта-

spectroscopic and intelligent methods improves the accuracy of determining the concentrations of exhaust components and allows detecting malfunctions at an early stage. It is concluded that it is necessary to integrate such systems with electronic control units and develop domestic portable diagnostic systems.

Keywords: diagnostics, analysis, engine, FTIR spectroscopy, emissions, technologies, on-board OBD-II systems, training, environmental standards.

тивных *PEMS*-комплексов (*Portable Emission Measurement Systems*), обеспечивающих многокомпонентный анализ в реальном времени [4-10].

В условиях роста автомобильного парка и необходимости соблюдения экологических нормативов проблема повышения эффективности диагностики двигателей внутреннего сгорания приобретает особую значимость. По данным «Коммерсантъ», ежегодно технический осмотр проходят почти 9 млн транспортных средств в России [11], что подчёркивает масштаб задач, связанных с обновлением диагностической базы и внедрением современных газоаналитических комплексов.

Исследования показывают, что по концентрациям CO , CO_2 , HC , O_2 , NO_x , а также по дополнительным компонентам (NH_3 , CH_2O , N_2O , PM) можно выявлять не только нарушения экологических параметров, но и конкретные неисправности: пропуски зажигания, обеднение смеси, деградацию катализатора, утечки в выхлопной системе [12-16].

Быстрое развитие интеллектуальных сенсоров и машинного обучения (*AI*, *transfer learning*, нейросети) позволяет создавать системы, способные интерпретировать изменения состава выхлопа в терминах технических дефектов двигателя, прогнозировать их развитие и снижать вероятность отказов [17-21]. Таким образом, анализ отработавших газов превращается из лабораторного метода экологического контроля в инструмент активной технической диагностики в составе интеллектуальных транспортных систем.

В литературе рассмотрены отдельные аспекты диагностики по составу выхлопа. Ряд авторов обобщает принципы и возможности *FTIR*-спектроскопии для многокомпонентного анализа выбросов [4, 22], другие исследователи рассматривают развитие сенсорных технологий и электрохимических датчиков [1, 2, 3, 23, 24]. Системные обзоры по *PEMS*-методикам и *on-board* измерениям представлены в работах [8-10, 12]. В последнее десятилетие особое внимание уделяется цифровизации и интеграции газоаналитических систем с *OBD*-платформами, что отражено в исследованиях [17, 18, 25, 26].

Однако в имеющихся публикациях недостаточно обобщены междисциплинарные подходы, связывающие физико-химические параметры выхлопа с диагностикой конкретных неисправностей бензиновых двигателей, особенно в контексте перехода к интеллектуальным и самообучающимся системам анализа.

С точки зрения транспортного машиностроения Российской Федерации особую актуальность приобретает развитие методов экспресс-диагностики бензиновых ДВС в условиях действующей системы технического осмотра и сервисного обслуживания автомобильного транспорта. В условиях обновления парка легковых и легких коммерческих автомобилей, а также присутствия значительного количества машин с пробегом более 10...15 лет возникает необходимость в диагностических технологиях, обеспечивающих достоверную оценку технического состояния без разборки агрегатов и дорогостоящих стендовых испытаний.

Для автотранспортных предприятий, городских автобусных парков и сервисных центров внедрение современных газоаналитических систем позволяет не только контролировать соблюдение экологических нормативов, но и снижать эксплуатационные затраты за счет раннего выявления неисправностей систем питания, зажигания и нейтрализации отработавших газов. Таким образом, развитие методов диа-

гностики бензиновых двигателей на основе анализа состава ОГ является важным направлением повышения надежности и экологической безопасности автотранспортных средств в транспортном машиностроении РФ.

Цель исследования — провести комплексный обзор современных методов диагностики технического состояния бензиновых двигателей внутреннего сгорания на основе анализа состава отработавших газов, обобщив существующие подходы, классифицировав применяемые технологии и выявив направления их дальнейшего развития.

Научная новизна работы заключается в следующем:

– выполнена комплексная систематизация современных методов диагностики технического состояния бензиновых двигателей внутреннего сгорания на основе анализа состава ОГ с выделением пяти ключевых классов технологий (традиционные газоанализаторы, спектроскопические методы, портативные системы *PEMS*, *on-board* сенсорные системы, интеллектуальные алгоритмы на основе машинного обучения);

– предложена сравнительная характеристика указанных классов методов с точки зрения их информативности, точности, быстродействия и пригодности для решения задач эксплуатационной диагностики автотранспортных средств;

– обобщены тенденции перехода от периодического контроля к непрерывному мониторингу технического состояния бензиновых ДВС на основе интеграции газоаналитических систем с электронными блоками управления и телематическими платформами;

– сформулированы практико-ориентированные рекомендации по развитию и внедрению методов диагностики по ОГ в транспортном машиностроении РФ, учитывающие специфику отечественной диагностической базы и условий эксплуатации автотранспорта.

Материалы и методы

Работа выполнена в формате систематического обзорного исследования на основе анализа отечественных и зарубежных источников за 2000–2025 гг. Используются публикации из баз данных *Scopus*, *Web of Science*, *MDPI*, *ScienceDirect* и *eLIBRARY.ru*. В отбор включены 39 источников, содержащих сведения о методах

диагностики бензиновых двигателей по составу ОГ [1–39].

Для систематизации данных все современные методы диагностики бензиновых ДВС по отработавшим газам были классифицированы по типу измерительного подхода (табл. 1).

Таблица 1
Классификация диагностических методов по анализу отработавших газов ДВС

Classification of diagnostic methods for the analysis of exhaust gases of internal combustion engines

Table 1

Класс методов	Примеры технологий	Основные источники
Традиционные газоанализаторы (4–5-газ)	Измерение CO, CO ₂ , HC, O ₂ , NO _x с помощью <i>NDIR</i> и электрохимических сенсоров	[27-29]
Спектроскопические методы	<i>FTIR</i> , <i>NDIR</i> , лазерная абсорбционная спектроскопия, оптоволоконные датчики	[4-7; 22]
Портативные системы (PEMS)	Комплексы для измерений в реальных условиях движения	[8-10]
On-board сенсорные системы	Электрохимические и твердотельные датчики NO _x , O ₂ , NH ₃ , интегрированные в <i>ECU</i>	[17-21; 30; 31]
Интеллектуальные и ML-методы	Искусственные нейронные сети, байесовские модели, <i>transfer learning</i> , прогнозирование выбросов	[17-21]

Такое деление позволило выделить не только используемые аппаратные решения, но и алгоритмические подходы, что важно для комплексного понимания направления развития диагностических технологий. Сравнение проводилось по критериям информативности, точности,

быстродействия и применимости к диагностике технического состояния двигателей. Полученные результаты легли в основу структурирования обзора и последующего обсуждения тенденций развития диагностических технологий.

Результаты и обсуждения

Результаты проведенного анализа позволили выявить основные направления развития и применения современных методов диагностики технического состояния бензиновых двигателей внутреннего сгорания по составу отработавших газов. Для наглядности и полноты анализа рассмотрим каждый из указанных методов диагностики более подробно.

Традиционные методы газоанализа (4–5-газовые анализаторы). Классические системы анализа ОГ основаны на измерении концентраций CO, CO₂, HC, O₂ и NO_x, что позволяет оценивать полноту сгорания и качество топливовоздушной смеси. Такие анализаторы используют нерассеянное инфракрасное излучение (*NDIR*) для опре-

деления CO, CO₂, HC и электрохимические сенсоры для O₂ и NO_x [27-29]. Эти методы просты в применении, обеспечивают достаточную точность для диагностики систем питания и зажигания и до сих пор широко применяются в сервисной практике. Однако их информативность ограничена: невозможно определить состав малых примесей (NH₃, CH₂O, N₂O), а динамическая реакция датчиков не всегда позволяет регистрировать быстрые переходные процессы [28].

В исследованиях [12, 13, 32] показано, что, несмотря на эти ограничения, пятикомпонентный анализ остаётся эффективным средством оценки технического

состояния при периодических проверках, особенно в сочетании с данными *OBD-II*.

В качестве иллюстрации практического применения газоаналитических методов целесообразно рассмотреть традиционный 5-газовый анализ отработавших газов, который на сегодняшний день широко используется при техническом осмотре и сервисной диагностике бензиновых двигателей внутреннего сгорания. Метод основан на определении концентраций CO , CO_2 , HC , O_2 и NO_x в ОГ с применением стационарных газоанализаторов, работающих на принципе нерассеянного инфракрасного излучения (*NDIR*) в сочетании с электрохимическими сенсорами.

По данным открытых испытаний, опубликованных в отчётах европейских исследовательских центров и нормативной документации *UNECE* и *EPA*, для исправного бензинового двигателя, оснащённого трёхкомпонентным каталитическим нейтрализатором, при работе на холостом ходу характерны следующие диапазоны концентраций компонентов ОГ: содержание CO составляет порядка 0,1...0,3 % об., CO_2 – 13,0...15,5 % об., концентрация углеводородов (в пересчёте на C_6H_{14}) находится в пределах 20...100 *ppm*, доля остаточного кислорода – 0,1...0,5 % об., а концентрация NO_x , как правило, не превышает 50...150 *ppm* [41, 42].

При этом коэффициент избытка воздуха λ располагается в интервале 0,98...1,02, что соответствует работе двигателя вблизи стехиометрического состава топливоздушонной смеси. Подобные значения рассматриваются в литературе как индикатор корректного функционирования систем впрыска и зажигания, а также эффективной работы каталитического нейтрализатора.

В отчётах, посвящённых испытаниям бензиновых автомобилей экологического класса *Euro-5*, отмечается, что рост концентрации CO выше 0,5 % и HC выше 150 *ppm* при практически неизменном уровне CO_2 , как правило, указывает на неполное сгорание топлива и возможные пропуски зажигания [41, 42]. Аналогич-

ные диагностические критерии приводятся и в руководствах *EPA*, где подчёркивается, что увеличение содержания O_2 свыше 1,0 % в сочетании с повышенными значениями NO_x свидетельствует об обеднённой смеси и локальном повышении температуры в камере сгорания.

Анализ экспериментальных данных показывает, что отклонение концентраций основных компонентов ОГ более чем на $\pm 10...15$ % от приведённых номинальных диапазонов позволяет выявлять нарушения в работе системы питания и зажигания ещё на ранней стадии, до появления диагностических кодов неисправностей в системе *OBD-II*. В этом контексте традиционный 5-газовый анализ сохраняет свою значимость как информативный и технологически доступный инструмент оценки технического состояния бензиновых двигателей при периодическом контроле.

Несмотря на ограниченный перечень измеряемых компонентов, данный метод обеспечивает достаточную диагностическую надёжность при выявлении типовых неисправностей и по-прежнему широко применяется в практике сервисных центров и пунктов технического осмотра, что позволяет рассматривать его в качестве базового элемента газоаналитической диагностики бензиновых ДВС. Таким образом традиционные 4–5-газовые анализаторы остаются базовым инструментом для оценки экологического состояния и полноты сгорания в бензиновых ДВС. Их преимущества – относительная простота, отработанные методики применения и наличие приборов в большинстве пунктов технического осмотра и сервисных центров. Вместе с тем ограниченный набор измеряемых компонентов и невысокая информативность по переходным режимам не позволяют использовать такие системы в качестве полноценного средства ранней диагностики сложных неисправностей. Наиболее перспективным направлением их развития является сочетание с данными *OBD-II* и использование расширенных алгоритмов анализа для классификации типовых дефектов.

Спектроскопические методы анализа (FTIR, NDIR, лазерная абсорбция).

Современное развитие диагностики двигателей связано с внедрением спектроскопических технологий, позволяющих выполнять многокомпонентный анализ в реальном времени.

Метод *FTIR* (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) обеспечивает регистрацию полного спектра излучения выхлопа и позволяет определять концентрации десятков веществ с высокой точностью [4, 5, 22]. По данным [4, 6, 7], *FTIR* применяется для измерения выбросов CO, CO₂, NO_x, HC, а также вторичных компонентов – формальдегида, метана, аммиака, закиси азота. Это делает возможным детальную диагностику процессов сгорания и оценки эффективности катализатора.

Ключевым преимуществом *FTIR* является высокая чувствительность и универсальность, однако для использования в сервисных условиях метод требует сложной оптической аппаратуры и дорогостоящего обслуживания [7, 8]. В работах [7; 8; 22] подчёркивается, что *FTIR*-технологии становятся основой для калибровки портативных систем (*PEMS*) и применения в реальных дорожных испытаниях.

Спектроскопические методы (*FTIR*, *NDIR*, лазерная абсорбция) обеспечивают высокую чувствительность и возможность многокомпонентного анализа состава выхлопа, что делает их особенно эффективными при исследовании процессов сгорания и оценке состояния систем нейтрализации. Основным ограничением на этапе внедрения в широкую эксплуатационную практику является высокая стоимость и сложность аппаратуры. В транспортном машиностроении РФ такие системы в первую очередь целесообразно использовать в качестве эталонных лабораторных комплексов и на кафедральных/испытательных стендах для формирования баз данных и методик диагностики.

Портативные измерительные системы (*PEMS*). Развитие портативных систем измерения выбросов (*PEMS*) позволило перенести лабораторную точность газоанализа в условия реальной эксплуатации автомобиля [8-10].

PEMS-комплексы сочетают *NDIR/FTIR*-датчики и потоковые масс-спектрометры, что обеспечивает контроль концентраций CO, CO₂, NO_x и CH₄ при изменяющихся нагрузках и скоростях. По результатам [9-10], применение *PEMS* даёт возможность оценивать работу двигателя и катализатора при реальных циклах (*RDE*, *WLTP*) и выявлять неисправности, не проявляющиеся в лабораторных условиях.

Исследования [8] показывают, что портативные комплексы уже достигают точности, сопоставимой с лабораторными системами, что делает их перспективным инструментом эксплуатационной диагностики.

Системы *PEMS* обеспечивают получение реалистичных данных о выбросах и техническом состоянии двигателя в условиях реальной эксплуатации. Они особенно полезны при оценке соответствия автотранспорта экологическим требованиям и при диагностике нестандартных режимов работы. Основными препятствиями к массовому внедрению являются стоимость оборудования и необходимость квалифицированного персонала для его обслуживания и интерпретации результатов. Для российских условий наиболее перспективно использование *PEMS* в крупных автотранспортных предприятиях и при сертификационных испытаниях.

***On-board* сенсорные технологии.** В современных бензиновых ДВС активно развиваются встроенные сенсорные системы, обеспечивающие непрерывный контроль состава выхлопа в реальном времени.

Основу таких систем составляют кислородные датчики (λ -зонды), NO_x-сенсоры, а также датчики аммиака и углеводородов, выполненные на основе электрохимических и твердотельных элементов [1-3, 30, 31]. В отличие от внешнего газоанализа, *on-board* сенсоры интегрированы в систему управления двигателем и используются как для регулирования состава смеси, так и для диагностики деградации катализатора [14, 33, 34].

В работе [31] отмечено, что современные NO_x-сенсоры способны выполнять функции самокалибровки и обеспечивают

высокую стабильность измерений даже при изменении температуры и состава газа. Такие решения обеспечивают переход от периодической диагностики к непрерывной, когда данные о состоянии двигателя и систем нейтрализации формируются в реальном времени и передаются в *ECU* или телематические системы автомобиля.

Важное место в газоаналитической диагностике занимает оценка эффективности трёхкомпонентного каталитического нейтрализатора (*TWC*). Диагностика осуществляется по результатам анализа сигналов двух кислородных датчиков (λ -зондов), установленных до и после катализатора. При исправном нейтрализаторе колебания напряжения первого датчика имеют выраженный характер, отражающий регулирование состава смеси, тогда как сигнал второго датчика стабилен и близок к среднему значению $\lambda = 1$ [14, 33]. Рост амплитуды или частоты колебаний на втором датчике указывает на деградацию каталитического слоя или потерю кислородной ёмкости катализатора [30, 34].

Таким образом, анализ динамики сигналов лямбда-зондов в сочетании с измерениями состава выхлопа позволяет оперативно оценивать состояние *TWC* и эффективность нейтрализации вредных компонентов.

Встроенные сенсорные системы в составе *ECU* позволяют реализовать непрерывный мониторинг технического состояния двигателя и систем нейтрализации. Они являются ключевым элементом перехода к концепции «умного» автотранспорта и удаленной диагностики. Ограничениями на текущем этапе являются высокая зависимость от корректности калибровок, чувствительность к условиям эксплуатации и неполная открытость алгоритмов автопроизводителей. Для транспортного машиностроения РФ важной задачей является адаптация и локализация подобных решений, а также развитие отечественных сенсорных компонентов.

Диагностика технического состояния по компонентному составу выхлопа. Состав отработавших газов отражает не только эффективность сгорания, но и наличие конкретных неисправностей.

В работах [12, 13, 32, 14-16] установлены типовые диагностические зависимости:

- рост CO и HC при нормальном уровне CO_2 указывает на неполное сгорание или пропуски зажигания;
- высокие значения O_2 и NO_x – признак обеднённой смеси и повышенной температуры сгорания;
- увеличение NH_3 и N_2O – деградация каталитического слоя;
- отклонение соотношений CO_2/CO и λ - нарушение работы топливной системы.

По данным [13], анализ отклонений концентраций в пределах $\pm 10...15\%$ от номинальных значений позволяет выявлять неисправности ещё до проявления ошибок в системе *OBD-II*.

Это делает анализ ОГ эффективным инструментом ранней диагностики.

Интеллектуальные методы и машинное обучение. Новые направления диагностики связаны с использованием методов искусственного интеллекта.

Нейросетевые и байесовские модели позволяют по данным газоанализа прогнозировать выбросы, классифицировать неисправности и выявлять деградацию компонентов двигателя [17-21, 26].

Так, в [19] представлена модель на основе *Elman Neural Network*, способная с высокой точностью предсказывать уровни CO и NO_x при изменении режимов работы двигателя. В работе [20] применена искусственная нейронная сеть (*ANN*) для прогнозирования реальных выбросов на основе параметров работы ДВС. Исследование [21] показало эффективность методов машинного обучения в оценке производительности и выбросов при работе бензиновых двигателей на альтернативных топливах. Интеграция таких алгоритмов с on-board системами (*OBD-II*) формирует основу интеллектуальных диагностических комплексов, способных автоматически определять тип неисправности и предсказывать срок службы компонентов.

Алгоритмы машинного обучения и искусственного интеллекта демонстрируют высокую эффективность при решении задач прогнозирования выбросов и клас-

сификации неисправностей по данным газоанализа [35-37]. Их применение позволяет перейти от пороговых критериев к вероятностной оценке технического состояния и прогнозированию остаточного ресурса элементов двигателя. Основным ограничением остается необходимость формирования репрезентативных обучающих выборок для конкретных условий эксплуатации и типов автотранспорта. В российских условиях важным направлением является создание национальных баз данных параметров выхлопа и типовых дефектов бензиновых ДВС.

Обобщение литературных данных показывает, что диагностика технического состояния бензиновых двигателей на основе анализа ОГ развивается в направлении:

1. Расширения спектра измеряемых компонентов – от 5 базовых газов к 15...20 параметрам с применением *FTIR*.

2. Интеграции с системами управления - переход от внешнего контроля к встроенным сенсорным платформам.

3. Использования цифровых технологий и *AI* - формирование интеллектуальных систем самодиагностики.

4. Миниатюризации оборудования - появление малогабаритных *PEMS* и *on-board* сенсоров.

Таким образом, современные методы позволяют не только контролировать выбросы, но и оценивать техническое состояние двигателя в режиме реального времени, что особенно важно в условиях перехода к концепции «умного транспорта» и повышенных требований к экологической безопасности.

Для условий транспортного машиностроения РФ особый интерес представляют методы, которые могут быть адаптированы к существующей диагностической инфраструктуре [38-40]. Традиционные 4–5-газовые анализаторы уже широко применяются в пунктах технического осмотра и на станциях технического обслуживания, поэтому их модернизация за счет внедрения расширенных алгоритмов обработки данных и интеграции с *OBD-II* является наиболее реалистичным направлением краткосрочного развития.

В среднесрочной перспективе для автотранспортных предприятий и крупных сервисных центров целесообразно внедрение компактных *PEMS*-комплексов и спектроскопических систем (*NDIR*, *FTIR*), позволяющих проводить проверку двигателей в реальных условиях эксплуатации и формировать цифровые профили технического состояния парка автомобилей. Такое решение особенно актуально для муниципального и корпоративного транспорта, работающего в жестких экологических зонах крупных городов.

Несмотря на широкое развитие газоаналитических методов, каждый из подходов имеет эксплуатационные и технические ограничения, влияющие на точность диагностики бензиновых ДВС. Для наглядности основные ограничения современных методик сведены в таблицу (табл. 2).

Реализация указанных мер позволит повысить точность и оперативность диагностики бензиновых двигателей, снизить затраты на техническое обслуживание и обеспечить соответствие экологическим стандартам будущего.

Особое внимание следует уделить цифровизации процессов контроля, развитию отечественной сенсорной базы и внедрению интеллектуальных систем диагностики, способных адаптироваться к реальным условиям эксплуатации. Для транспортного машиностроения РФ ключевым является развитие отечественной элементной базы газоаналитических систем. Создание линейки российских газоанализаторов и портативных измерительных комплексов, адаптированных к национальным условиям эксплуатации (широкий диапазон температур, пылеватость воздуха, использование топлива различного качества), позволит снизить зависимость от импортного оборудования и обеспечить доступность современных диагностических технологий для региональных сервисных центров и автотранспортных предприятий.

Как видно из табл. 2, ни один из методов не является универсальным. Традиционные газоанализаторы подходят для базовых проверок, но уступают спектро-

скопии по информативности. Спектроскопические и *PEMS*-системы обеспечивают высокую точность, однако ограничены стоимостью и сложностью применения. Встроенные датчики обеспечивают непрерывный контроль, но имеют узкий диапазон измерений. Интеллектуальные методы

дают перспективы автоматической диагностики, но требуют качественных данных для обучения. Поэтому на практике наиболее эффективен комбинированный подход, объединяющий несколько методов диагностики.

Таблица 2

Основные ограничения современных методов диагностики ДВС по составу отработавших газов

Table 2

Main limitations of modern diagnostic methods of internal combustion engine by exhaust gas composition

Метод	Основные ограничения
Традиционные 4–5-газовые анализаторы	Ограниченный набор измеряемых компонентов; низкая чувствительность к ранним неисправностям; влияние температуры и режима работы.
Спектроскопические методы (<i>FTIR/NDIR</i>)	Высокая стоимость и сложность оборудования; необходимость калибровки; чувствительность оптики к загрязнению.
Портативные системы <i>PEMS</i>	Влияние вибраций и условий реального движения; задержка в линиях отбора проб; высокая стоимость комплексов.
<i>On-board</i> датчики (λ -зонды, NO_x -сенсоры)	Ограниченный спектр измерений; старение и дрейф чувствительности; зависимость от условий эксплуатации и качества топлива.
Интеллектуальные методы (<i>ML/AI</i>)	Требуются большие обучающие выборки; снижение точности при переносе моделей; зависимость качества результатов от данных сенсоров.

Указанные ограничения определяют необходимость дальнейшего совершенствования методов газоаналитической диагностики и адаптации их к условиям эксплуатации автотранспортных средств. Таким образом, с учётом выявленных огра-

ничений и особенностей современных диагностических систем автором сформулированы рекомендации (табл. 3), направленные на повышение эффективности и практической применимости методов анализа ОГ.

Таблица 3

Рекомендации по применению и развитию методов диагностики бензиновых ДВС на основе анализа отработавших газов

Table 3

Recommendations for the use and development of methods for the diagnosis of gasoline internal combustion engines based on exhaust gas analysis

№	Направление	Содержание рекомендации	Ожидаемый эффект
1	Расширение спектроскопических методов	Внедрение <i>FTIR</i> и <i>NDIR</i> -анализаторов в сервисную и лабораторную практику	Повышение точности определения состава выхлопа и выявления неисправностей систем питания и зажигания
2	Интеграция с электронными системами управления	Объединение газоаналитических данных с <i>ECU</i> и <i>OBD-II</i> для непрерывного мониторинга	Ранняя диагностика и предупреждение отказов двигателя и катализатора
3	Разработка отечественных <i>PEMS</i> -комплексов	Создание портативных измерительных систем, адаптированных к российским условиям эксплуатации	Удешевление диагностики и повышение доступности контроля выбросов

№	Направление	Содержание рекомендации	Ожидаемый эффект
4	Формирование эталонных баз данных	Создание цифровых библиотек спектров отработавших газов ДВС различного состояния	Стандартизация критериев оценки и обучение нейросетевых моделей
5	Применение методов машинного обучения	Использование искусственного интеллекта для анализа и интерпретации состава выхлопа	Автоматизация диагностики и прогнозирование технического состояния
6	Подготовка специалистов нового профиля	Введение курсов по интеллектуальной диагностике и сенсорным технологиям	Повышение квалификации инженерно-технических кадров в отрасли

Заключение

Проведённый анализ современных методов диагностики бензиновых двигателей внутреннего сгорания по составу ОГ показал, что данный подход остаётся одним из наиболее информативных и перспективных направлений технического контроля.

Традиционные 4–5-газовые анализаторы обеспечивают базовую оценку полноты сгорания и экологического состояния двигателя, в то время как спектроскопические методы (*FTIR*, *NDIR*) и портативные системы *PEMS* позволяют получать расширенную информацию о химическом составе выбросов в динамических режимах. Развитие встроенных сенсорных технологий и интеграция газоанализа с системами управления ДВС (*OBD-II*) создают условия для перехода от периодической диагностики к непрерывному мониторингу технического состояния. Применение алгоритмов машинного обучения открывает возможность автоматического выявления неисправностей и прогнозирования состояния элементов двигателя по спектру ОГ.

Отдельного внимания заслуживает развитие отечественных газоаналитических комплексов и сенсорных технологий, что позволит обеспечить технологический суверенитет в области диагностики автотранспортных средств и адаптировать применяемые решения к реальным условиям эксплуатации автопарка РФ. В перспективе использование подобных систем в сочетании с интеллектуальными алгоритмами открывает возможности для внедрения полноценных интегрированных платформ мониторинга технического состояния автотранспорта в транспортном машиностроении.

Таким образом, сочетание спектроскопических, сенсорных и интеллектуальных методов формирует основу для построения интегрированных диагностических систем нового поколения, обеспечивающих повышение надёжности, экономичности и экологической безопасности бензиновых двигателей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Riegel J., Neumann H., Wiedenmann H.-M. Exhaust Gas Sensors for Automotive Emission Control. *Solid State Ionics*. 2002. Vol. 152–153. P. 783–800. DOI: 10.1016/S0167-2738(02)00329-6.
- Moos R. Catalysts as Sensors-A Promising Novel Approach in Automotive Exhaust Gas Aftertreatment. *Sensors*. 2010. Vol. 10, no. 7. P. 6773–6787. DOI: 10.3390/s100706773.
- Moos R. A Brief Overview on Automotive Exhaust Gas Sensors Based on Electroceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2005. Vol. 2. P. 401–413. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2005.02041.x.
- Giechaskiel B., Clairotte M. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy for Measurements of Vehicle Exhaust Emissions: A Review. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 16. P. 7416. DOI: 10.3390/app11167416.
- Fuśnik Ł., Szafraniak B., Paleczek A., Grochala D., Rydosz A. A Review of Gas Measurement Set-Ups. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 7. P. 2557. DOI: 10.3390/s22072557.
- Bante S., Karale S., Awari G. A Systematic Review on Real Time Exhaust Gas Sensing System for On Board Sensing of Harmful Gases in IC Engine. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1170. P. 012012. DOI: 10.1088/1757-899X/1170/1/012012.
- Awad O. I., Ma X., Kamil M., Ali O. M., Zhang Z., Shuai S. Particulate Emissions from Gasoline Di-

- rect Injection Engines: A Review. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 718. Article 137302. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137302.
8. Giechaskiel B. et al. Assessment of On-Board and Laboratory Gas Measurement Systems for Future Heavy-Duty Emissions Regulations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19, no. 10. P. 6199. DOI: 10.3390/ijerph19106199.
 9. Kousoulidou M., Fontaras G., Ntziachristos L., Bonnel P., Samaras Z. Use of Portable Emissions Measurement System (PEMS) for Regulatory Purposes: The EU Perspective. *Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 64. P. 329–338. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.09.062.
 10. Lee S. et al. On-Road Portable Emission Measurement Systems Test Data Analysis and Light-Duty Vehicle In-Use Emissions Development. *SAE International Journal of Electric Vehicles*. 2020. Vol. 9, no. 2. P. 111–131. DOI: 10.4271/14-09-02-0007.
 11. Коммерсантъ. 2025. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/6427198> (дата обращения: 12.11.2025).
 12. Kochanek A. et al. The Analysis of Exhaust Composition Serves as the Foundation for the Development of a Diagnosing Methodology of Internal Combustion Engines. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, no. 8. P. 3420. DOI: 10.3390/su17083420.
 13. Dzieniszewski G., Kubon M., Zieliński D. Assessment of the Possibility of Using Exhaust Gas Composition in Predicting the Technical Condition of the Engine. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2025. DOI: 10.53502/jraae-199729.
 14. Steiner C. et al. Catalyst State Diagnosis of Three-Way Catalytic Converters Using Different Resonance Parameters with Special Focus on Amplitude and Phase. *Sensors (Basel)*. 2019. Vol. 19, no. 16. P. 3559. DOI: 10.3390/s19163559.
 15. Salehi R., Alasty A., Shahbakhti M. Detection and Isolation of Faults in the Exhaust Path of Turbocharged Automotive Engines. *International Journal of Automotive Technology*. 2015. Vol. 16. P. 127–138. DOI: 10.1007/s12239-015-0014-5.
 16. Tamura M., Saito H., Murata Y., Kokubu K., Morimoto S. Misfire Detection on Internal Combustion Engines Using Exhaust Gas Temperature in Combination with Crankshaft Angle Variation. *Applied Thermal Engineering*. 2011. Vol. 31. P. 4125–4131. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.08.026.
 17. Torres N. N. S. et al. Fault Diagnosis in Internal Combustion Engines Using Artificial Intelligence Predictive Models. *Applied System Innovation*. 2025. Vol. 8, no. 5. P. 147. DOI: 10.3390/asi8050147.
 18. Michailidis E. T., Panagiotopoulou A., Papadakis A. A Review of OBD-II-Based Machine Learning Applications for Sustainable, Efficient, Secure, and Safe Vehicle Driving. *Sensors (Basel)*. 2025. Vol. 25, no. 13. P. 4057. DOI: 10.3390/s25134057.
 19. Miranda M. H. R. et al. Novel Prediction Approach for Exhaust Gases Using Elman Neural Network Combined with Particle Swarm Optimization. *Energy*. 2025. Vol. 331(C).
 20. Baghani A., Chitsaz I., Teymoori M. M. A Novel Method for Real Driving Emission Prediction Utilizing an Artificial Neural Network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 137. P. 109267.
 21. Pugazhendi P., Albuquerque C., Mendes A., Vanaja S., Pichandi C., Raja M. Investigations on the Applicability of Machine Learning Algorithms for Predicting Emissions and Performance of Ethanol–Water-Fueled Spark-Ignition Engines. *Combustion Theory and Modelling*. 2025. P. 1–28. DOI: 10.1080/13647830.2025.2552850.
 22. Workman J. A Review of the Latest Research Applications Using FT-IR Spectroscopy. *Spectroscopy*. 2024. P. 22–28. DOI: 10.56530/spectroscopy.ak9689m8.
 23. Ménil F., Coillard V., Lucat C. Critical Review of Nitrogen Monoxide Sensors for Exhaust Gases of Lean Burn Engines. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2000. Vol. 67. P. 1–23. DOI: 10.1016/S0925-4005(00)00401-9.
 24. López Méndez Á. Characterization of NO_x Sensor Performance for On-Board Diagnosis: MSc thesis. 2023.
 25. Arulogun O. A., Fakolujo A., Waheed M. A., Omidiora E., Ogunbona P. Characterization of Gasoline Engine Exhaust Fumes Using Electronic Nose. *Global Journal of Research Engineering*. 2011. Vol. 11.
 26. Zeng W. et al. Transfer Learning for Transient NO_x, PN and THC Emission Prediction of Non-Road Diesel Engines Based on NRTC Experiments. *Environmental Science: Processes & Impacts*. 2025. Vol. 27, no. 10. P. 3272–3285. DOI: 10.1039/d5em00321k.
 27. Best Exhaust 5 Gas Analyzer for Automotive [Электронный ресурс]. URL: <https://www.forensicsdetectors.com/blogs/articles/small-engine-exhaust-gas-analyzer> (дата обращения: 12.11.2025).
 28. Кончаков А. А. Анализ отработавших газов двигателей внутреннего сгорания автомобилей: методические рекомендации. 2020.
 29. Анализ отработавших газов БЕА [Электронный ресурс]. URL: <https://simplepage.narod.ru/eva/catalog/bosch/bea.pdf> (дата обращения: 12.11.2025).
 30. Harach T. et al. Novel Method for Determining Internal Combustion Engine Dysfunctions on Platform as a Service. *Sensors (Basel)*. 2023. Vol. 23, no. 1. P. 477. DOI: 10.3390/s23010477.
 31. Brandt E., Wang Y., Grizzle J. A Simplified Three-Way Catalyst Model for Use in On-Board SI Engine Control and Diagnostics. *Proc. ASME Dynamic System and Control Division*. 2000. Vol. 61.
 32. Fremerey P. et al. Determination of the NO_x Loading of an Automotive Lean NO_x Trap by a Microwave-Based Method. *Sensors (Basel)*. 2011. Vol. 11, no. 9. P. 8261–8280. DOI: 10.3390/s110908261.

33. Lyu P., Wang P. (Slade), Liu Y., Wang Y. Review of the Studies on Emission Evaluation Approaches for Operating Vehicles. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2021. Vol. 8, no. 4. P. 493–509. DOI: 10.1016/j.jtte.2021.07.004.
34. He P., Li Y., Wang J. Study on the Exhaust System Parameters of a Small Gasoline Engine. *SAE Technical Paper*. 2008. DOI: 10.4271/2008-01-1766.
35. Rodrigues N. F. et al. Misfire Detection in Automotive Engines Using a Smartphone Through Wavelet and Chaos Analysis. *Sensors (Basel)*. 2022. Vol. 22, no. 14. P. 5077. DOI: 10.3390/s22145077.
36. Lee B., Guezennec Y., Rizzoni G. Model-Based Fault Diagnosis of Spark-Ignition Direct-Injection Engine Using Nonlinear Estimations. *SAE Transactions*. 2005. Vol. 114. P. 190–200.
37. Romahadi D. et al. Bayesian Networks Approach on Intelligent System Design for the Diagnosis of Heat Exchanger. *SINERGI*. 2022. Vol. 26. P. 127–136. DOI: 10.22441/sinergi.2022.2.001.
38. Огнев И. И., Огнев И. Г., Пятаев М. В. и др. Анализ норм токсичности отработавших газов дизельного двигателя автотранспортных средств. В сб.: *Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: сб. ст.*

REFERENCES

1. Riegel J, Neumann H, Wiedenmann H-M. Exhaust Gas Sensors for Automotive Emission Control. *Solid State Ionics*. 2002;152–153:783–800. DOI: 10.1016/S0167-2738(02)00329-6.
2. Moos R. Catalysts as Sensors-A Promising Novel Approach in Automotive Exhaust Gas Aftertreatment. *Sensors*. 2010;10(7):6773–6787. DOI: 10.3390/s100706773.
3. Moos R. A Brief Overview on Automotive Exhaust Gas Sensors Based on Electroceramics. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2005;2:401–413. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2005.02041.x.
4. Giechaskiel B, Clairotte M. Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy for Measurements of Vehicle Exhaust Emissions: Review. *Applied Sciences*. 2021;11(16):7416. DOI: 10.3390/app11167416.
5. Fuśnik Ł, Szafraniak B, Paleczek A, Grochala D, Rydosz A. A Review of Gas Measurement Set-Ups. *Sensors*. 2022;22(7):2557. DOI: 10.3390/s22072557.
6. Bante S, Karale S, Awari G. A Systematic Review on Real Time Exhaust Gas Sensing System for On Board Sensing of Harmful Gases in IC Engine. *IOP Conference Series*, 2021: *Materials Science and Engineering*. 2021;1170:012012. DOI: 10.1088/1757-899X/1170/1/012012.
7. Awad OI, Ma X, Kamil M, Ali OM, Zhang Z, Shuai S. Particulate Emissions from Gasoline Direct Injection Engines: Review. *Science of the Total Envi-*

ronment. 2020;718:137302. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137302.

39. Григорьев М. В., Зенченко В. А. Компьютерная диагностика двигателя EJ253 на автомобиле Subaru Outback: учебно-методическое пособие. Москва: Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2022. 52 с. EDN DCBPDV.
40. Заськин Д. В., Попов Д. М. Совершенствование технологического процесса ремонта ДВС и агрегатов с разработкой стенда для разборки и сборки ДВС. В кн.: *Каталог выпускных квалификационных работ Кузбасского государственного аграрного университета – 2023*. Кемерово: Кузбасский государственный аграрный университет, 2023. С. 81–83. EDN CSTLJX.
41. Which Emissions Does a 5 Gas Analyzer Read Automotives [Электронный ресурс]. URL: <https://www.globalmrv.com/which-emissions-does-a-5-gas-analyzer-read-automotives/?utm> (дата обращения: 27.04.2024).
42. HC, CO, CO₂, O₂, NO Emission Analyzer Gasoline and Diesel Exhaust Gas Analyzer [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hkrok.com/products/hc-co-co2-o2-no-emission-analyzer-gasoline-and-diesel-exhaust-gas-analyzer/?utm> (дата обращения: 27.04.2024).
8. Giechaskiel B. Assessment of On-Board and Laboratory Gas Measurement Systems for Future Heavy-Duty Emissions Regulations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(10):6199. DOI: 10.3390/ijerph19106199.
9. Kousoulidou M, Fontaras G, Ntziachristos L, Bonnel P, Samaras Z. Use of Portable Emissions Measurement System (PEMS) for Regulatory Purposes: The EU Perspective. *Atmospheric Environment*. 2013;64:329–338. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.09.062.
10. Lee S. On-Road Portable Emission Measurement Systems Test Data Analysis and Light-Duty Vehicle In-Use Emissions Development. *SAE International Journal of Electric Vehicles*. 2020;9(2):111–131. DOI: 10.4271/14-09-02-0007.
11. Kommersant. 2025 [Internet]. [cited 2025 Nov 30]. Available from: <https://www.kommersant.ru/doc/6427198>
12. Kochanek A. The Analysis of Exhaust Composition Serves as the Foundation for the Development of a Diagnosing Methodology of Internal Combustion Engines. *Sustainability*. 2025;17(8):3420. DOI: 10.3390/su17083420.
13. Dzieniszewski G, Kubon M, Zieliński D. Assessment of the Possibility of Using Exhaust Gas Composition in Predicting the Technical Condition of the Engine. *Journal of Research and Applications in*

- Agricultural Engineering. 2025. DOI: 10.53502/jraae-199729.
14. Steiner C. Catalyst State Diagnosis of Three-Way Catalytic Converters Using Different Resonance Parameters with Special Focus on Amplitude and Phase. *Sensors (Basel)*. 2019;19(16):3559. DOI: 10.3390/s19163559.
 15. Salehi R, Alasty A, Shahbakhti M. Detection and Isolation of Faults in the Exhaust Path of Turbocharged Automotive Engines. *International Journal of Automotive Technology*. 2015;16:127–138. DOI: 10.1007/s12239-015-0014-5.
 16. Tamura M, Saito H, Murata Y, Kokubu K, Morimoto S. Misfire Detection on Internal Combustion Engines Using Exhaust Gas Temperature in Combination with Crankshaft Angle Variation. *Applied Thermal Engineering*. 2011;31:4125–4131. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.08.026.
 17. Torres NNS. Fault Diagnosis in Internal Combustion Engines Using Artificial Intelligence Predictive Models. *Applied System Innovation*. 2025;8(5):147. DOI: 10.3390/asi8050147.
 18. Michailidis ET, Panagiotopoulou A, Papadakis A. A Review of OBD-II-Based Machine Learning Applications for Sustainable, Efficient, Secure, and Safe Vehicle Driving. *Sensors (Basel)*. 2025;25(13):4057. DOI: 10.3390/s25134057.
 19. Miranda MHR. Novel Prediction Approach for Exhaust Gases Using Elman Neural Network Combined with Particle Swarm Optimization. *Energy*. 2025;331(C).
 20. Baghani A, Chitsaz I, Teymoori MM. A Novel Method for Real Driving Emission Prediction Utilizing an Artificial Neural Network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024;137:109267.
 21. Pugazhendi P, Albuquerque C, Mendes A, Vanaja S, Pichandi C, Raja M. Investigations on the Applicability of Machine Learning Algorithms for Predicting Emissions and Performance of Ethanol–Water-Fueled Spark-Ignition Engines. *Combustion Theory and Modelling*. 2025:1–28. DOI: 10.1080/13647830.2025.2552850.
 22. Workman J. A Review of the Latest Research Applications Using FT-IR Spectroscopy. *Spectroscopy*. 2024;22–28. DOI: 10.56530/spectroscopy.ak9689m8.
 23. Ménil F, Coillard V, Lucat C. Critical Review of Nitrogen Monoxide Sensors for Exhaust Gases of Lean Burn Engines. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2000;67:1–23. DOI: 10.1016/S0925-4005(00)00401-9.
 24. López Méndez Á. Characterization of NO_x Sensor Performance for On-Board Diagnosis [dissertation]; 2023.
 25. Arulogun OA, Fakolujo A, Waheed MA, Omidiora E, Ogunbona P. Characterization of Gasoline Engine Exhaust Fumes Using Electronic Nose. *Global Journal of Research Engineering*. 2011;11.
 26. Zeng W. Transfer Learning for Transient NO_x, PN and THC Emission Prediction of Non-Road Diesel Engines Based on NRTC Experiments. *Environmental Science: Processes and Impacts*. 2025;27(10):3272–3285. DOI: 10.1039/d5em00321k.
 27. Best Exhaust 5 Gas Analyzer for Automotive [Internet]. [cited 2025 Nov 12]. Available from: <https://www.forensicsdetectors.com/blogs/articles/small-engine-exhaust-gas-analyzer>
 28. Konchakov AA. Analysis of exhaust gases from internal combustion engines of automobiles: guideline. 2020.
 29. BEA Exhaust Gas Analysis [Internet]. [cited 2025 Nov 12]. Available from: <https://simplepage.narod.ru/eva/catalog/bosch/bea.pdf>
 30. Harach T. Novel Method for Determining Internal Combustion Engine Dysfunctions on Platform as a Service. *Sensors (Basel)*. 2023;23(1):477. DOI: 10.3390/s23010477.
 31. Brandt E, Wang Y, Grizzle J. A Simplified Three-Way Catalyst Model for Use in On-Board SI Engine Control and Diagnostics. *Proc. ASME Dynamic System and Control Division*. 2000;61.
 32. Fremerey P. Determination of the NO_x Loading of an Automotive Lean NO_x Trap by a Microwave-Based Method. *Sensors (Basel)*. 2011;11(9):8261–8280. DOI: 10.3390/s110908261.
 33. Lyu P, Wang P, Liu Y, Wang Y. Review of the Studies on Emission Evaluation Approaches for Operating Vehicles. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2021;8(4):493–509. DOI: 10.1016/j.jtte.2021.07.004.
 34. He P, Li Y, Wang J. Study on the Exhaust System Parameters of a Small Gasoline Engine. *SAE Technical Paper*. 2008. DOI: 10.4271/2008-01-1766.
 35. Rodrigues NF. Misfire Detection in Automotive Engines Using a Smartphone Through Wavelet and Chaos Analysis. *Sensors (Basel)*. 2022;22(14):5077. DOI: 10.3390/s22145077.
 36. Lee B, Guezennec Y, Rizzoni G. Model-Based Fault Diagnosis of Spark-Ignition Direct-Injection Engine Using Nonlinear Estimations. *SAE Transactions*. 2005;114:190–200.
 37. Romahadi D. Bayesian Networks Approach on Intelligent System Design for the Diagnosis of Heat Exchanger. *SINERGI*. 2022;26:127–136. DOI: 10.22441/sinergi.2022.2.001.
 38. Ognev II, Ognev IG, Pyataev MV. Analysis of exhaust gas toxicity standards for diesel engine vehicles. *Collection of Scientific Papers, 2021: Innovative Development of Land Transport Equipment and Technologies*; Ural University. Yekaterinburg: Publishing House of Ural University; 2021.
 39. Grigoriev MV, Zenchenko VA. Computer diagnostics of EJ253 engine on a Subaru Out-back car: educational guideline. Moscow: Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); 2022.
 40. Zaskin DV, Popov DM. Improvement of repair process of internal combustion engines and aggregates with the development of test rig for disassembly and assembly of internal combustion engines. In: *Catalog of Final Papers of Kuzbass State Agrar-*

- ian University – 2023. Kemerovo: Kuzbass State Agrarian University; 2023.
41. Which Emissions Does a 5 Gas Analyzer Read Automotives [Internet]. [cited 2024 April 27]. Available from: <https://www.globalmrv.com/which-emissions-does-a-5-gas-analyzer-read-automotives/?utm>

42. HC, CO, CO₂, O₂, NO Emission Analyzer Gasoline and Diesel Exhaust Gas Analyzer [Internet]. [cited 2024 April 27]. Available from: <https://www.hkrok.com/products/hc-co-co2-o2-no-emission-analyzer-gasoline-and-diesel-exhaust-gas-analyzer/?utm>.

Информация об авторе:

Тарабрин Павел Витальевич – аспирант, Российский университет дружбы народов, Москва.

Tarabrin Pavel Vitalievich – Postgraduate student, RUDN University of Russia, Moscow.

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 27.01.2026; одобрена после рецензирования 06.05.2026; принята к публикации 27.05.2026. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», проректор по научной работе Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 27.01.2026; approved after review on 06.05.2026; accepted for publication on 27.05.2026. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Vice-Rector for Scientific Work at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.

* * *

**В Брянском государственном техническом университете в 2026 году
продолжается приём на новую специальность
23.05.03 – Подвижной состав железных дорог,
специализация «Технология производства и ремонта подвижного состава»**

Подготовка предусматривает освоения фундаментальных основ конструкции, технического обслуживания и ремонта подвижного состава железных дорог с применением предиктивной аналитики, систем искусственного интеллекта и работы с большими объемами данных. Обучение организовано в интересах крупнейших предприятий в области обслуживания и ремонта подвижного состава таких, как ООО «Локотех», ОАО «РЖД», ООО «Новая вагоноремонтная компания» и другие.

Начиная со второго курса обучения студентам предоставляется возможность оплачиваемой стажировки на структурных подразделениях компаний с целью приобретения практических навыков необходимых для освоения профессий технолога и инженера. В рамках освоения программы значительное внимание уделяется современным методам прогнозирования технического состояния подвижного состава, системам массового обслуживания и ремонта сложных технических систем, прогнозирования фактического состояния ответственных узлов подвижного состава и оценке рисков возникновения аварийных ситуаций.

Приобретённые по программе специалитета компетенции позволят обучающимся стать высококвалифицированными специалистами, которые смогут применить полученные знания и навыки на практике, участвуя в реализации стратегических проектов по развитию железнодорожной инфраструктуры страны.