

ТРАНСПОРТ

УДК 621.432.3; 621.43.047

<https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-5-58>

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПО ПАРАМЕТРАМ ТОКСИЧНОСТИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ В ОТДЕЛЬНЫХ ЦИЛИНДРАХ

А. В. Гриценко¹, К. В. Глемба²

Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет); Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия

¹ e-mail: alexgrits13@mail.ru

² e-mail: glemba77@mail.ru

Г. Н. Салимоненко

ООО «ОМГ СДМ», Челябинск, Россия

e-mail: salimonenkog@mail.ru

Аннотация. Известно, что удельный вес отказов элементов системы электроснабжения автомобильных поршневых двигателей достигает 45% всех его отказов, в том числе 9% случаев составляют отказы элементов системы зажигания. Анализ данной статистики показывает, что наиболее подвержены износу, перегреву и значительному нагружению свечи зажигания. Предлагаемый заводами изготовителями разброс ресурсных параметров свечей зажигания в пределах 10–60 тыс. км усугубляет ситуацию своевременной замены. Выявлено, что срок замены свечей зажигания может корректироваться, так как их гарантированный ресурс порой не соответствует заявленному. Определено, что применяемые средства для диагностирования системы зажигания (в классическом варианте: мотор-тестер, газоанализатор) не позволяют акцентировать нагрузку на отдельный элемент и вывести его на экстремальный режим работы, при котором проявляются скрытые отказы. Чувствительность и достоверность существующих методов находятся на низком уровне, т. к. на форму осциллограммы влияет множество факторов, включая наводки в измерительной цепи и погрешности измерений, необходимость частой тарировки измерительных каналов, что закладывает существенную ошибку в процесс диагностирования. **Целью исследований** является повышение достоверности диагностирования элементов системы зажигания автомобильных двигателей на основе анализа параметров токсичности при селективном отборе пробы отработавших газов на тестовых режимах. **Предложен метод** поиска неисправностей и оценки технического состояния элементов системы зажигания на тестовых режимах при селективном отборе пробы отработавших газов, для реализации которого разработан программно-аппаратный комплекс тестового диагностирования. На базе разработанных методик **создана методология** комплексного определения технического состояния свечей зажигания в двигателях автомобилей ВАЗ и ГАЗ по результатам анализа состава отработавших газов на сравнительных номограммах. **Научная новизна:** разработана математическая модель изменения вторичного напряжения в зависимости от искрового межэлектродного зазора свечи зажигания; установлена взаимосвязь пробивного напряжения в межэлектродном зазоре свечи зажигания и плотности воздуха в камере испытательного прибора, где самым весомым фактором выступает несоответствие межэлектродного зазора свечи зажигания его номинальному значению; установлена зависимость параметров состава и содержания вредных веществ в отработавших газах от технического состояния элементов системы зажигания в отдельных цилиндрах двигателя. **Практическая значимость** работы заключается в возможности непрерывного контроля элементов системы зажигания тестовым методом, в частности свечей системы зажигания, учитывая индивидуальный вклад каждой свечи на процесс выпуска и содержание параметров токсичности в отработавших газах. **Дальнейшие исследования** по данной теме целесообразно распространить на другие марки автомобилей, а также газомоторные установки с элементами автоматизирования процесса диагностирования.

Ключевые слова: диагностирование, тестовый режим, система зажигания, пробивное напряжение, зазор свечи, параметры токсичности.

Для цитирования: Гриценко А. В., Глемба К. В., Салимоненко Г. Н. Обоснование методики диагностирования системы зажигания автомобильных бензиновых двигателей по параметрам токсичности отработавших газов в отдельных цилиндрах // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2022. – № 5. – С. 58–73. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-5-58>.

SUBSTANTIATION OF THE METHOD FOR DIAGNOSING THE IGNITION SYSTEM OF AUTOMOBILE PETROL ENGINES BY EXHAUST GAS TOXICITY PARAMETERS IN INDIVIDUAL CYLINDERS

A.V. Gritsenko¹, K. V. Glemba²

South Ural State University (national research university); South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

¹ e-mail: alexgrits13@mail.ru

² e-mail: glemba77@mail.ru

G. N. Salimonenko

OMG SDM LLC, Chelyabinsk, Russia

e-mail: salimonenkog@mail.ru

Abstract. It is known that the proportion of failures of the elements of the power supply system of automobile piston engines reaches 45% of all its failures, including 9% of cases are failures of the elements of the ignition system. An analysis of this statistics shows that spark plugs are most susceptible to wear, overheating and significant loading. The range of resource parameters of spark plugs offered by manufacturers within 10-60 thousand km aggravates the situation of timely replacement. It was revealed that the period for replacing spark plugs can be adjusted, since their guaranteed resource sometimes does not correspond to the declared one. It has been determined that the means used for diagnosing the ignition system (in the classic version: a motor-tester, a gas analyzer) do not allow to accentuate the load on a separate element and bring it to an extreme operating mode, in which hidden failures appear. The sensitivity and reliability of existing methods are at a low level, because many factors influence the shape of the oscillogram, including interference in the measuring circuit and measurement errors, the need for frequent calibration of the measuring channels, which introduces a significant error in the diagnostic process. **The purpose** of the research is to increase the reliability of diagnosing the elements of the ignition system of automobile engines based on the analysis of toxicity parameters during selective sampling of exhaust gases in test modes. A method for troubleshooting and assessing the technical condition of the elements of the ignition system in test modes with selective sampling of exhaust gases is proposed, for the implementation of which a software and hardware complex for test diagnostics has been developed. On the basis of the developed methods, a methodology for the comprehensive determination of the technical condition of spark plugs in the engines of VAZ and GAZ vehicles was created based on the results of the analysis of the composition of exhaust gases on comparative nomograms. **Scientific novelty:** a mathematical model of the change in the secondary voltage depending on the spark interelectrode gap of the spark plug has been developed; the relationship between the breakdown voltage in the interelectrode gap of the spark plug and the air density in the chamber of the test device is established, where the most significant factor is the discrepancy between the interelectrode gap of the spark plug to its nominal value: the dependence of the parameters of the composition and content of harmful substances in the exhaust gases on the technical condition of the elements of the ignition system in individual engine cylinders. **The practical significance** of the work lies in the possibility of continuous monitoring of the elements of the ignition system by the test method, in particular the spark plugs of the ignition system, taking into account the individual contribution of each spark plug to the exhaust process and the content of toxicity parameters in the exhaust gases. **Further research** on this topic should be extended to other brands of cars, as well as gas engine installations with elements of automating the diagnostic process.

Key words: diagnostics, test mode, ignition system, breakdown voltage, spark gap, toxicity parameters.

Cite as: Gritsenko, A. V., Glemba, K. V., Salimonenko, G. N. (2022) [Substantiation of the method for diagnosing the ignition system of automobile petrol engines by exhaust gas toxicity parameters in individual cylinders]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 5, pp. 58–73. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-5-58>.

Введение

В современных тенденциях насыщения электронными системами отечественных и зарубежных автомобилей растёт спрос на цифровое (электронное) диагностическое оборудование [6, 10]. Наблюдается устойчивый тренд – чем чаще возникают отказы в процессе эксплуатации по соответствующей системе или узлу, тем большее количество разработок диагностического оборудования сопровождают эту автомобильную систему [2, 12, 16]. Причем степень насыщения автомобильного

транспорта электронными системами становится все выше с каждым годом [7, 18, 21]. Рассмотрим статистику отказов современных автомобилей (А. Е. Королева, Н. Я. Говорущенко и др.) и проведем анализ их распределения по системам и механизмам (рисунок 1) [8, 17, 20]. Анализ данных на рисунке 1 показал, что наибольшую вероятность возникновения отказа имеют системы зажигания, электрооборудование, и это подтверждается многочисленными исследованиями [15, 23].

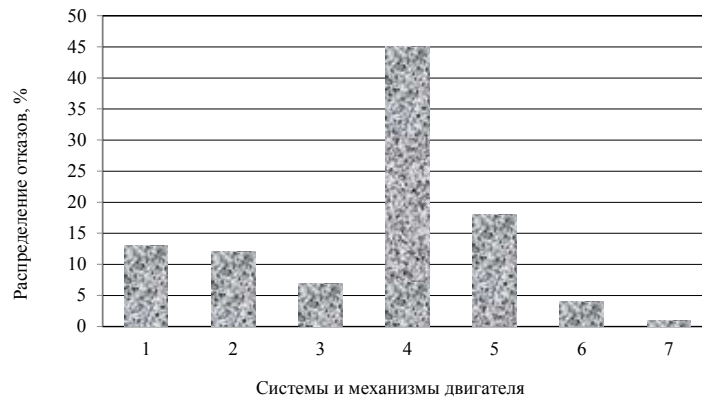


Рисунок 1. Распределение отказов, возникающих в двигателе автомобиля по системам и механизмам: 1 – цилиндропоршневая группа (13%); 2 – кривошипно-шатунный механизм (12%); 3 – газораспределительный механизм (7%); 4, 5, 6, 7 – соответственно, системы зажигания и электрооборудования (45%), питания (18%), охлаждения (4%), смазки (1%)

Источник: данные А. Е. Королева и др. [8, 17]

Согласно работе Е. В. Кузнецова распределение процента отказов по элементам системы управле-

ния для бензиновых ДВС выглядит следующим образом (рисунок 2).



Рисунок 2. Распределение отказов по элементам системы управления бензиновых двигателей: 1 – электрические цепи (окисление и обрыв проводов) (35%); 2 – электробензонасос (22%); 3 – регулятор холодного хода (10%); 4 – элементы системы зажигания (9%); 5 – форсунки (8%); 6 – датчик кислорода (7%); 7 – реле (6%); 8 – электронный блок управления (3%)

Источник: данные Е. В. Кузнецова

По рисунку 2 видно, что процент отказов элементов системы зажигания составляет 9%, но значительную часть могут составлять окисление и обрыв проводов. Таким образом, количество указанных отказов может резко возрасти, приводя к росту параметров токсичности и расхода топлива. Так, в ра-

ботах В. В. Невзорова и В. М. Овчинникова [9, 11] описываются причины превышения токсичности отработавших газов для автомобилей с бензиновым двигателем. На рисунке 3 представлены данные в процентах, взятые из указанных работ. Наблюдается максимум, приходящий на причины, связан-

ные с нарушением регулировок систем зажигания и питания. Проанализировав информацию, можно утверждать, что численность отказов системы зажигания находится на крайне высоком уровне [14]. Основными причинами роста числа отказов данной системы являются следующие: работа в условиях запыленности и существенного перепада температур, эксплуатация в крайних северных и южных

регионах с агрессивным климатом, несоблюдение регламента технического обслуживания и текущего ремонта (ТО и ТР), ошибки при проведении ТО и ТР, низкий уровень используемого топлива и смазочных материалов, некачественные расходные материалы, механические повреждения при эксплуатации в сложных дорожных условиях и др. [15].

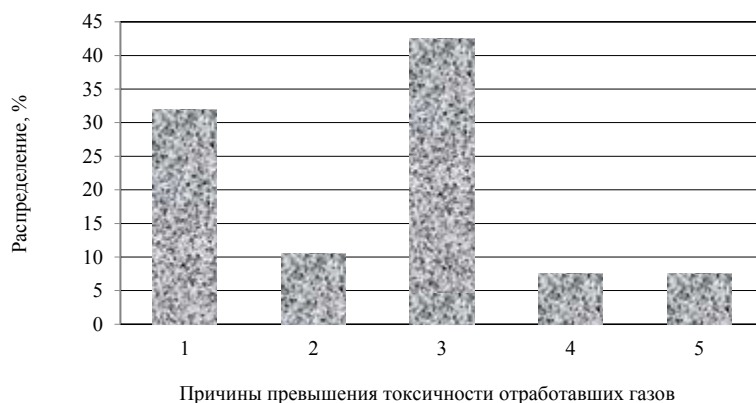


Рисунок 3. Распределение причин превышения токсичности отработавших газов для автомобилей с бензиновым двигателем: 1 – нарушение регулировок системы топливоподдачи (32%); 2 – изменение параметров датчиков и нарушение работы электронного блока управления (10,5%); 3 – нарушение регулировок системы зажигания и газораспределения (42,5%); 4 – нарушение герметичности всасывающего коллектора (7,5%); 5 – изменение технического состояния цилиндропоршневой группы (7,5%)

Источник: данные В. В. Невзорова и В. М. Овчинникова [9, 11]

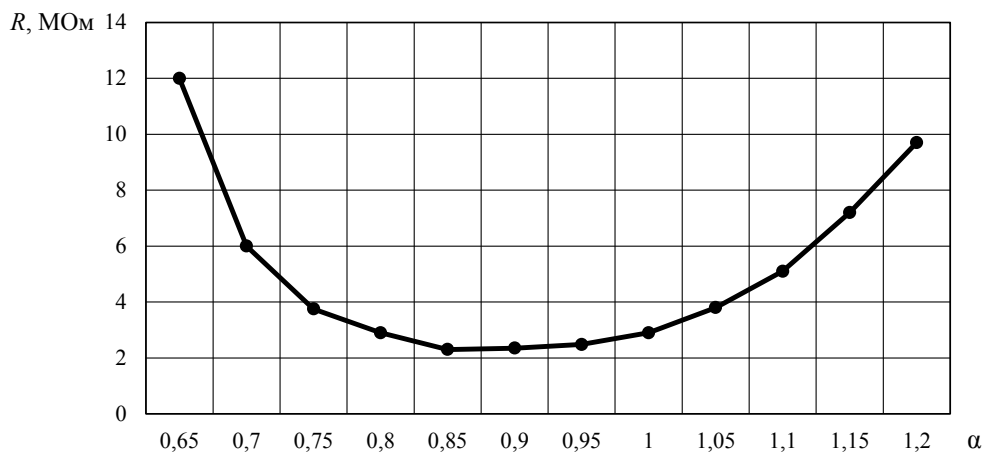


Рисунок 4. Зависимость величин шунтирующих сопротивлений на межэлектродном зазоре системы зажигания R , МОм при изменении состава рабочей смеси α

Источник: данные источников [17]

Одним из наиболее эффективных способов повышения экологических показателей транспортных средств является применение систем зажигания, обеспечивающих бесперебойное воспламенение топливно-воздушной смеси (ТВС) [1, 26]. Однако в практике эксплуатации часто возникают ситуации, когда система зажигания имеет низкую

наджность [4, 24] по причине сложности процесса воспламенения ТВС в широко варьируемых условиях, что можно наблюдать на графике рисунка 4 [22, 25]. В области богатых и бедных смесей шунтирующее сопротивление в межэлектродном зазоре принимает в несколько раз большие значения. Так, при $\alpha = 0,65$ шунтирующее сопротивление

ние R составит около 12 МОм, а при $\alpha = 1,2$ – около 9,7 МОм. Работа на богатой смеси характерна для режимов пуска и динамичного разгона, но работа на бедной смеси – для постоянных режимов благоприятного процесса сгорания, и при этих условиях создаются условия неблагоприятной работы, что приводит к снижению надежности большинства элементов системы зажигания (в частности, свечи зажигания). На состояние свечей зажигания также могут пагубно влиять смоло-содержащие продукты горения [5, 19], например, на автомобилях при долговременной эксплуатации часто наблюдается повышенный расход масла, так как происходит износ либо залегание маслясьёмных колец. Электроды свечи покрываются налетом (нагаром), который существенно влияет на качество искрообразования, на комплексное сопротивление в зазоре свечи [13].

Большой вклад в изучение связи состояния элементов системы зажигания с параметрами токсичности отработавших газов (ОГ) внесли А. Б. Ламм, Н. Я. Говорущенко, С. М. Францев, Г. Н. Злотин, А. Н. Никонов, Е. А. Федянов и др. В их исследованиях раскрыты вопросы совершенствования методов и средств диагностирования систем зажигания современных автомобилей, однако указывается и низкая их достоверность, и сложность контроля [7, 10]. Ими установлено, что слабоэффективным способом контроля технического состояния системы зажигания является применение датчиков кислорода, установленных в выпускной системе автомобиля [15]. В системе зажигания выявлен наиболее подверженный износу элемент – свеча зажигания [6]. При оценке параметров работы свечей зажигания выявлены известные диагностические параметры: ток, напряжение ионизации, сопротивление, параметры токсичности [10]. В практике оценки технического состояния систем зажигания очень часто используется мотор-тестер, который позволяет оценить выходные осциллограммы напряжения и тока. Полученные осциллограммы анализируются, предварительно подвергаясь разбивке на более мелкие участки с характерными точками и формами. Для ряда технических состояний приводятся классические осциллограммы идентификации. Однако, когда дело касается комбинации неисправностей с их взаимным наложением друг на друга, то готовых осциллограмм не предлагается. Но в обширных исследованиях указывается сложность взаимовлияния и невозможность идентификации технического состояния элементов системы зажигания [1, 5, 6]. Кроме того, известная проблема с интерпретацией отдельных участков усложняется еще большей сложностью при появлении помех и наводок в измерительный тракт. В немногочисленных работах, посвященных диагностированию системы зажигания, указывается на постоянную

необходимость тарировки измерительных каналов и средств [14, 15, 17]. Для чего необходимо использовать эталонные делители напряжения, генераторы импульсов, которые не содержатся в комплекте мотор-тестеров и требуют дополнительных весомых денежных затрат. Контроль системы зажигания при помощи классического варианта применения метода газоанализа сопряжен с существенной многозначностью выходного сигнала. Для идентификации вклада отдельных цилиндров двигателя используют метод разгона-выбега [1]. При этом идентифицируя высокое содержание СН или медленный разгон с проблемами воспламенения смеси (чаще со свечами зажигания). Но практика газоанализа показывает на высокую корреляцию СН к неисправностям не только системы зажигания, но и механизма газораспределения, системы питания, системы впуска, цилиндропоршневой группы. Все это подвигает на поиск новых методов диагностирования системы зажигания с возможностью точечного (селективного, выборочного) контроля отдельных элементов. Это происходит за счет обособования новых диагностических режимов и контролируемых параметров, таких как: пульсация тока и напряжения, отклонение частоты вращения коленвала при тестовом воздействии, динамика разгона при тестовом воздействии, динамика разгона при тестовом воздействии, концентрации компонентов CO , CH , O_2 и NO_2 на тестовых режимах при селективном отборе пробы ОГ [7]. Анализ исследований показывает, что высокую достоверность при оценке технического состояния системы зажигания позволяют реализовать метод индивидуального газоанализа и перспективные средства диагностирования (осциллограф и разработанное устройство в виде догружателя бензинового двигателя «ДБД-4») [3, 7]. Таким образом, **целью исследований** является повышение достоверности диагностирования элементов системы зажигания автомобильных двигателей на основе анализа параметров токсичности при селективном отборе пробы отработавших газов на тестовых режимах.

Теоретические исследования

В начале теоретических исследований уместно рассмотреть возможные факторы, способствующие снижению эффективности работы систем зажигания. Разделив их на ранги, получим следующее распределение (рисунок 5), где самым весомым фактором выступает несоответствие межэлектродного зазора свечи номинальному значению по причине его существенного износа в процессе эксплуатации автомобилей.

В теоретической части исследований необходимо было рассмотреть степень влияния межэлектродного зазора свечи зажигания и плотности воздуха в камере испытательного прибора на параметры вторичного напряжения. За основу были взя-

ты данные исследований С. В. Францева [14, 15], и сведены в таблицу 1. Графическая интерпретация которых были преобразованы в дискретные точки данных таблицы 1 представлена на рисунке 6.

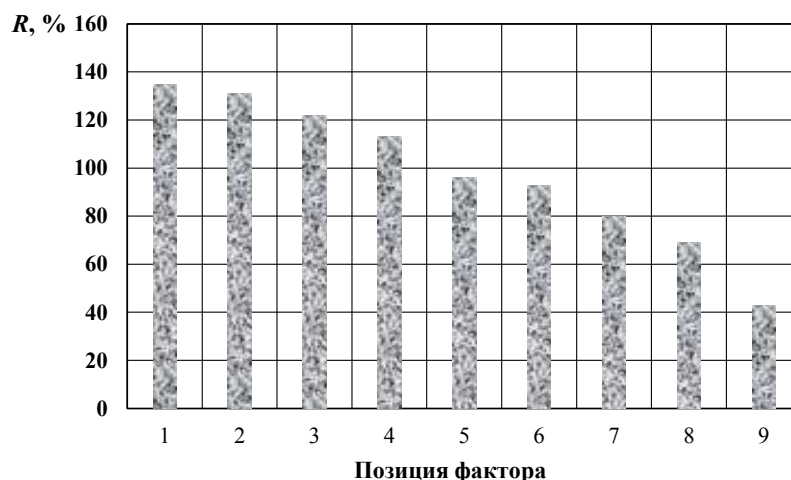


Рисунок 5. Зависимость веса ранга R , % снижения степени эффективности системы зажигания от позиции соответствующего фактора: 1 – несоответствие межэлектродного зазора свечи номинальному значению; 2 – отклонение реального угла опережения зажигания от оптимального; 3 – наличие значительно выступающего теплового конуса свечи зажигания; 4 – влияние марки применяемого топлива; 5 – калильное число свечи зажигания; 6 – зольность применяемого моторного масла; 7 – количество присадок в топливе для повышения детонационной стойкости; 8 – текущая наработка свечи зажигания (пробег автомобиля с момента последней замены свечи зажигания); 9 – коэффициент избытка воздуха в некоторых режимных точках

Источник: составлено авторами

Таблица 1. Теоретические данные по исследованиям С. В. Францева

Плотность воздуха в камере испытательного прибора ρ , кг/м ³	Приращение вторичного напряжения dU_2/dt , кВ/мкс		
	$Z = 0,5$	$Z = 0,7$	$Z = 1,4$
7	2,45	2,80	4,57
8	1,83	2,07	3,27
9	1,41	1,57	2,39
10	1,13	1,24	1,79
11	0,93	1,01	1,39
12	0,80	0,85	1,11
13	0,71	0,75	0,92
14	0,65	0,67	0,79
15	0,61	0,62	0,71
16	0,58	0,59	0,65
17	0,56	0,57	0,61
18	0,55	0,55	0,58
19	0,54	0,54	0,56
20	0,53	0,54	0,55

Источник: данные С. В. Францева [14, 15]

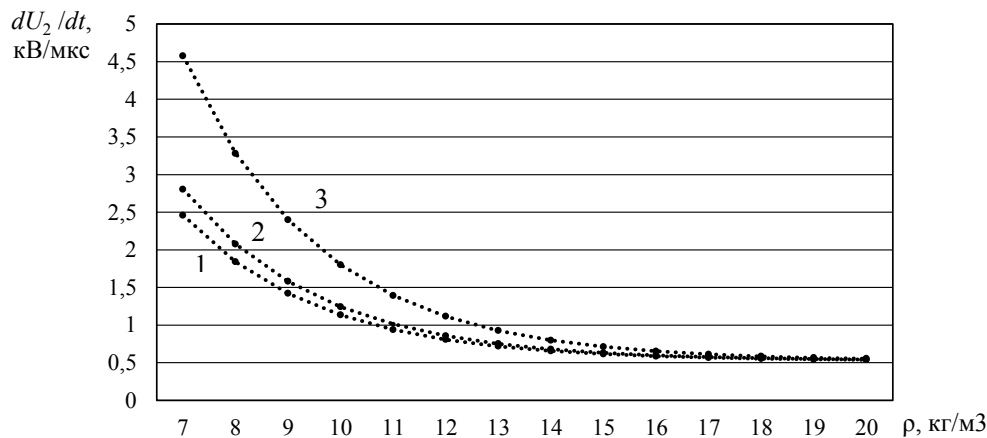


Рисунок 6. Зависимость приращения вторичного напряжения dU_2/dt , кВ/мкс от плотности воздуха в камере испытательного прибора ρ , кг/м³ при различных зазорах в свече зажигания: 1 – $Z = 0,5$ мм; 2 – $Z = 0,7$ мм; 3 – $Z = 1,4$ мм

Источник: составлено авторами

Как видно из рисунка 6, при установке свечи зажигания с максимальным зазором 1,4 мм изменение вторичного напряжения достигает наибольших значений, что еще не говорит о начале воспламенения ТВС при таких предельных зазорах (плотность воздуха определялась в камере испытательного прибора Э-2033П).

В связи с этим данные таблицы 1 были приняты на начальном этапе рассмотрения для первичного выбора вариации зазоров свечи зажигания. Обобщенный анализ зависимости рисунка 5 позволил установить взаимосвязь в виде уравнения:

$$\delta_{св} = 0,526 + e^{2,951 + 0,822 \frac{dU_2}{dt} - 0,386\rho}, \quad (1)$$

где

- $\delta_{св}$ – межэлектродный зазор свечи зажигания, мм;
- dU_2/dt – скорость нарастания вторичного напряжения, кВ/мкс;
- ρ – плотность воздуха в зазоре свечи, кг/м³.

В процессе исследований были приняты дискретные точки пробивного напряжения в зазоре

свечи зажигания, которые выражены в графиках рисунка 7 [15, 17].

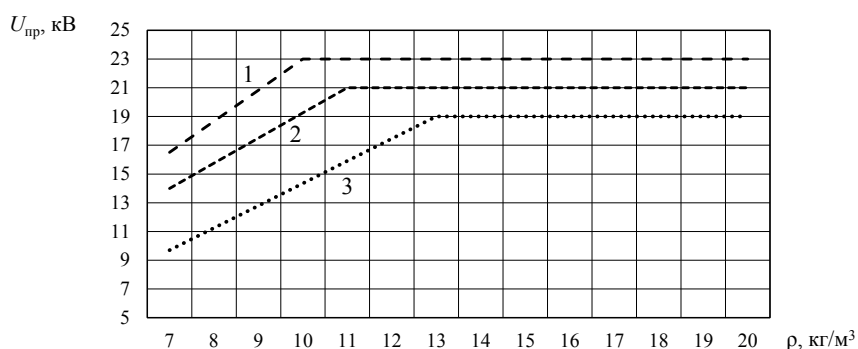


Рисунок 7. Зависимость величины пробивного напряжения $U_{пр}$, кВ от плотности воздуха в камере испытательного прибора ρ , кг/м³ при различных величинах приращения вторичного напряжения dU_2/dt : 1, 2 и 3 – соответственно, 0,5, 0,7 и 1,4 кВ/мкс

Источник: составлено авторами

Рассмотрим взаимосвязь пробивного напряжения $U_{пр}$ (кВ) с плотностью воздуха ρ (кг/м³) в камере

испытательного прибора Э-2033П и скоростью нарастания вторичного напряжения dU_2/dt (кВ/мкс)

при межэлектродном зазоре 0,9 мм (рисунок 7). В практике эксплуатации систем зажигания рабочие зазоры свечей зажигания находятся в пределах 0,7 ... 1,1 мм, следовательно, при дальнейшем моделировании прием ограничения этой величины – не более 1,1 мм и не менее 0,3 мм.

Методика исследований

В методической части исследований в качестве экспериментальной установки был выбран двигатель ВАЗ 2110 (мощность 56 кВт, объем 1,5 л, 4 цилиндра, 8 клапанов), включающий: распределенный впрыск, каталитический нейтрализатор, модульную систему зажигания, микропроцессорную систему управления. Электронный блок управления (ЭБУ) данного двигателя является базовым

для целого ряда более поздних моделей автомобилей ВАЗ, таких как *Lada Priora, Lada Granta, Lada Kalina, Lada Vesta, Lada Largus*.

Для проведения исследования был разработан исследовательский стенд, схема которого включает основные элементы (рисунок 8): двигатель ВАЗ 2110, разработанный прибор – догрузатель «ДБД-4», мотор-тестер МТ-10, персональный компьютер (ПК), 4-х компонентный газоанализатор. Кроме того, показаны объекты, которые подвергались доработке или изменению: глушитель с установленными шайбами различного эквивалентного сечения, свечи зажигания с вариацией зазора, λ -зонд (для исключения коррекции по обратной связи заменялся имитатором), точки сверления на выпускном коллекторе для ввертывания щупа забора проб ОГ [7, 10].

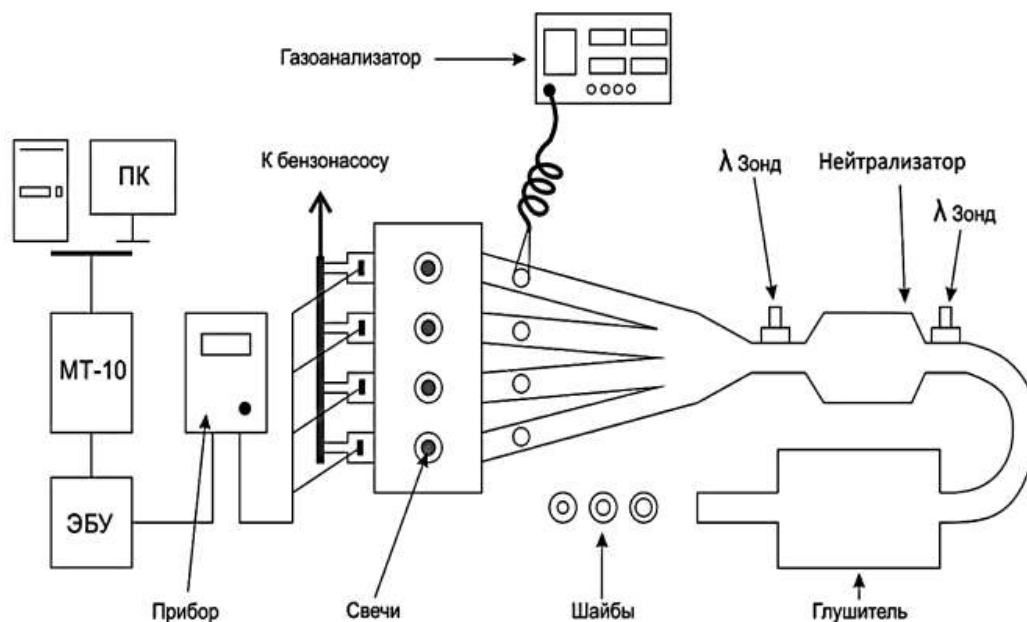


Рисунок 8. Схема исследовательского стенда

Источник: составлено авторами

В процессе эксперимента для обеспечения необходимого процента открытия дроссельной заслонки в любом заданном положении было изготовлено устройство фиксации, которое устанавливалось на штатное место направляющего механизма тросика педали акселератора (рисунок 9). При необходимости осуществляется воздействие на рукоятку управления до необходимой величины изменения процента (степени) открытия дроссельной заслонки, что фиксируется на экране компьютера посредством мотор-тестера МТ-10.

Для имитации неисправностей системы зажигания были подготовлены свечи зажигания с шагом зазора от 0,3 до 1,5 мм (0,3, 0,5, 0,7, 0,9, 1,1, 1,3, 1,5). Типоразмеры зазоров в свечах зажигания были выбраны с учетом проблем искрообразова-

ния при переобогащении и переобеднении ТВС. Токсичность выхлопных газов контролировалась при помощи 4-х компонентного газоанализатора ИНФРАКАР М 2.01. Подготовка газоанализатора к измерениям выполнялась по прилагаемой к нему инструкции. Газозаборная трубка подсоединялась к зонду для индивидуального газоанализа. Снятые в процессе проведения экспериментов параметры фиксировались в бланках регистрации результатов эксперимента.

Реальное время впрыска топлива (после коррекции) контролировалось при помощи разработанного прибора «ДБД-4». Информация о текущем времени впрыска отображалась на дисплее прибора (рисунок 10). Напряжение ионизации свечей зажигания и температура масла двигате-

ля контролировались при помощи USB-Autoscope III (осциллографа Постоловского) [7, 10]. Прибор имеет высокую универсальную применяемость по

различным автомобильным маркам. Оснащается гальванической развязкой измерительных цепей и шины USB.

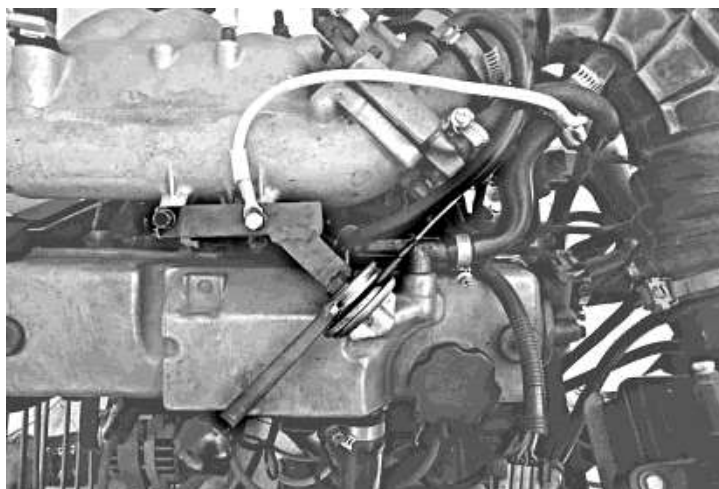


Рисунок 9. Устройство управления дроссельной заслонкой
Источник: составлено авторами



Рисунок 10. Контроль времени впрыска топлива на дисплее разработанного прибора «ДБД-4»
Источник: составлено авторами

Экспериментальные исследования проводились в следующем порядке: на первый цилиндр двигателя устанавливались свеча зажигания с номинальным искровым зазором и электромагнитная форсунка с номинальной подачей топлива при штатном (номинальном) сопротивлении выпускной системы; двигатель прогревался до рабочей температуры охлаждающей жидкости в 90 °С и масла не менее 50 °С; при помощи прибора «ДБД-4» отключались три электромагнитные форсунки; устанавливался уровень открытия дроссельной заслонки в 20% при помощи устройства фиксации дроссельной заслонки, далее догрузателем корректировалось время впрыска (максимально обеднялась или обогащалась смесь); газозаборная трубка газоанализатора подключалась к змеевику для охлаждения выхлопных газов; производился отбор пробы ОГ при стабилизации всех контролируемых параметров, после чего показания газоанализатора заносятся в таблицу эксперимента. После проведения испытаний с полностью исправными элементами двигателя производилась замена свечи зажигания на аналогичную с отклонением

от нормы как в большую, так и в меньшую сторону (вариация зазора 0,3–1,5 мм). Далее проводился прогрев двигателя до рабочей температуры и измерялись параметры токсичности ОГ с фиксацией данных эксперимента.

После подготовительных проверок системы зажигания были проведены испытания свечей зажигания с номинальным зазором и с отклонением как в большую, так и в меньшую сторону с проведением отбора пробы ОГ. Диагностические параметры абсолютных значений пробы ОГ заносятся в таблицу эксперимента и далее преобразовывались в относительные процентные величины. Нулевое значение выбрано при эталонном состоянии элементов, указанном заводом изготовителем.

Результаты экспериментальных исследований

В самом начале испытаний проводился контроль выходных параметров системы зажигания экспериментальной установки со снятием характеристики угла опережения подачи напряжения на свечу (рисунок 11).

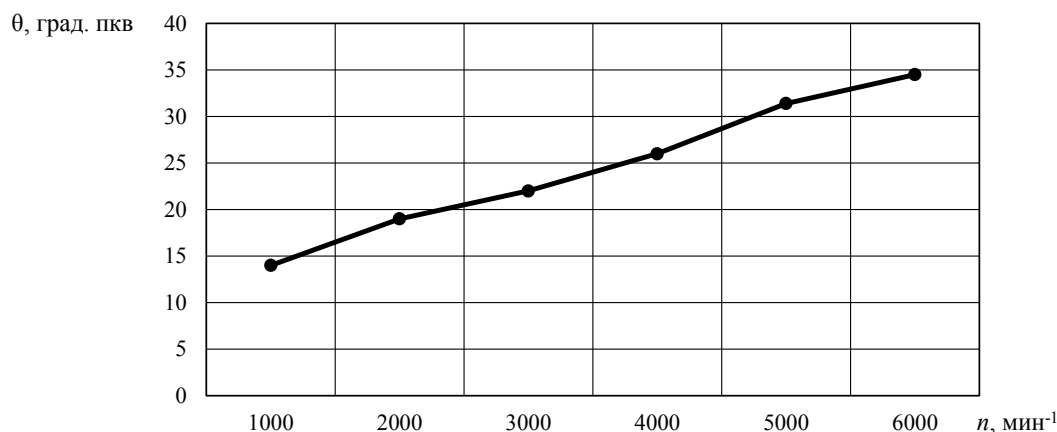


Рисунок 11. Зависимость угла опережения зажигания θ , град. пкв от частоты вращения коленчатого вала двигателя n , мин⁻¹

Источник: составлено авторами

Значения промежуточных точек сравнивались с табличными значениями для оценки правильности контроля, после чего экспериментально определялась зависимость требуемого вторичного напряжения системы зажигания от изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя в режиме полного открытия дроссельной заслонки (рисунок 12). На пусковой частоте вращения коленчатого вала требуемое вторичное напряжение достигает максимума – 27 кВ, и по мере увеличения частоты

вращения оно уменьшается. При частоте вращения коленчатого вала 6000 мин⁻¹ требуемое вторичное напряжение составило 15,9 кВ. Надо сказать, что для современных систем зажигания практически нет затруднений для реализации необходимого вторичного напряжения при любом возможном режиме, однако в наших исследованиях необходимо было убедиться в правильности функционирования системы зажигания перед проведением основных экспериментов.

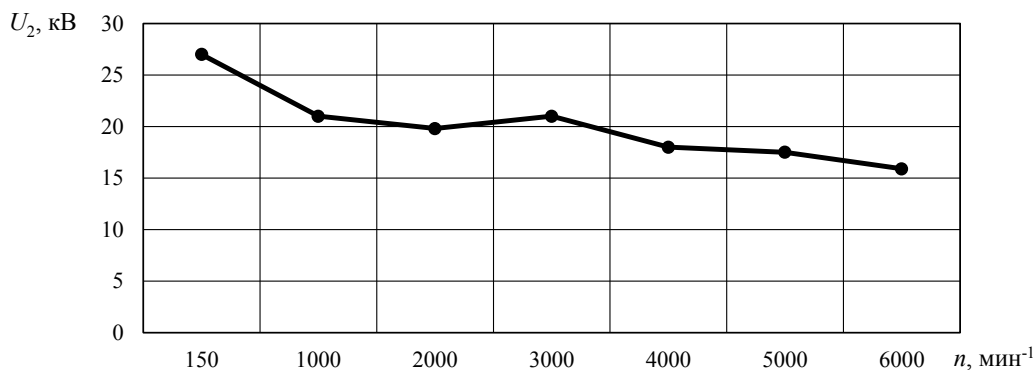


Рисунок 12. Зависимость требуемого вторичного напряжения системы зажигания U_2 , кВ от частоты вращения коленчатого вала двигателя n , мин⁻¹ в режиме полного открытия дроссельной заслонки

Источник: составлено авторами

Далее была экспериментально определена зависимость пробивного напряжения свечи зажигания от изменения частоты вращения коленчатого вала двигателя в режиме полного открытия дроссельной заслонки (рисунок 13). Пробивное напряжение свечи зажигания $U_{пр}$, кВ несколько меньше требуемого вторичного напряжения системы зажигания U_2 , кВ. Разница может составлять 3...7 кВ в зависимости от режима контроля.

Результат проведения экспериментальных ис-

следований на двигателе ВАЗ 2110 представлен в виде относительных величин на графиках зависимости (рисунок 14). При номинальном зазоре свечи зажигания параметры находятся в нулевой точке – 100%. Видно, что наиболее чувствительными диагностическими параметрами в зоне максимальных зазоров свечи зажигания являются параметры: n , CO , CH . При увеличении искрового промежутка свечи зажигания до максимального 1,1 мм отклонение этих параметров составило: n – 95%, CO – 96%,

СН – 83%. При уменьшении искрового промежутка свечи зажигания до 0,3 мм изменение параметров составило: n – 62%, CO – 86%, CH – 53%. Чувствительность параметра CH в зоне малых зазоров

составляет 20–23% на изменение зазора свечи зажигания в 0,1 мм. В зоне больших зазоров увеличение зазора в 0,1 мм приводит к изменению CH в 10–11%.

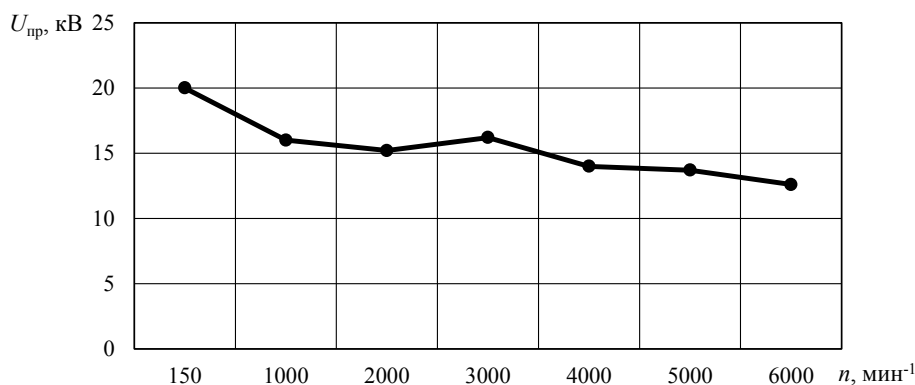


Рисунок 13. Зависимость пробивного напряжения свечи зажигания $U_{пр}$, кВ от частоты вращения коленчатого вала двигателя n , мин⁻¹ в режиме полного открытия дроссельной заслонки

Источник: составлено авторами

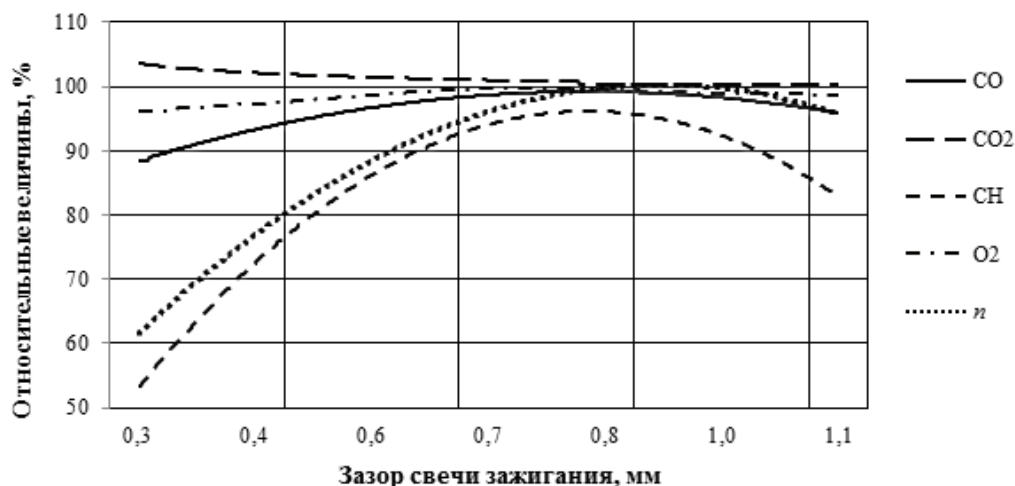


Рисунок 14. Зависимости относительной величины выходных диагностических параметров двигателя ВАЗ 2110 (концентрации CO , CO_2 , CH , O_2 , %, частоты вращения коленвала n , %) от изменения зазора свечи зажигания

Источник: составлено авторами

Результат проведения экспериментальных исследований на двигателе ЗМЗ 4062.10 представлен в виде относительных величин на графиках зависимости (рисунок 15). Наиболее чувствительными диагностическими параметрами при этом оказались следующие: n , CO , CO_2 . При увеличении искрового промежутка свечи зажигания до максимального значения в 1,1 мм отклонение указанных параметров составило: n – 97%, CO – 110%, CO_2 – 94%. При уменьшении искрового промежутка до 0,3 мм изменение параметров составило: n – 60%,

CO – 90%, CO_2 – 107%. Рассмотренные параметры токсичности рекомендуется использовать для идентификации технического состояния свечей системы зажигания бензиновых двигателей.

Как видно из рисунков 14 и 15 изменение рабочего зазора свечи зажигания сопровождается мгновенным изменением комбинации параметров токсичности, и фиксация этих изменений в практике эксплуатации позволяет оперативно определять степень изменения технического состояния свечей зажигания. Здесь же, в зоне малых зазоров

высокую чувствительность имеет параметр – изменение частоты вращения коленчатого вала. Так изменение зазора свечи зажигания на 0,1 мм приводит в среднем к 15–20% снижению частоты вращения. Параметры токсичности в зоне увели-

чения и уменьшения зазора на 0,1 мм изменяются на 3–12% в зависимости от конкретного параметра. Во всех зонах контроля наблюдается однозначность идентификации технического состояния свечи зажигания.

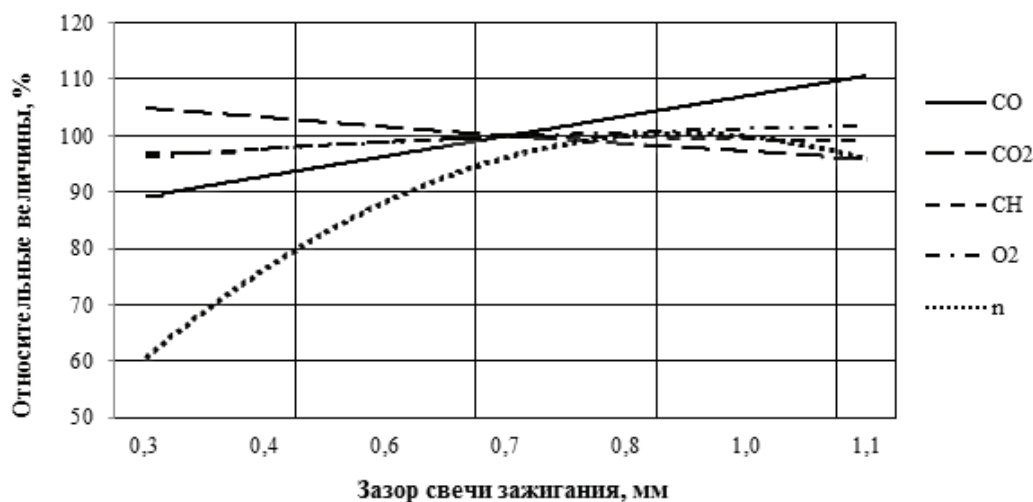


Рисунок 15. Зависимость относительной величины выходных диагностических параметров ЗМЗ 4062.10 (концентрации CO, CO₂, CH, O₂, %, частоты вращения коленвала n, %) от изменения зазора свечи зажигания

Источник: составлено авторами

В процессе выполнения исследований установлены новые результаты:

1. Разработана обобщенная математическая модель изменения состава отработавших газов в зависимости от искрового промежутка электродов свечи зажигания при тестовом контроле;

2. Установлена взаимосвязь частоты вращения коленчатого вала двигателя от вариации зазора свечи зажигания при изменении степени открытия дроссельной заслонки в пределах 0–100%;

3. На базе разработанных методик создана методология комплексного определения технического состояния свечей зажигания автомобилей ВАЗ и ГАЗ по результатам анализа состава отработавших газов на сравнительных номограммах;

4. Получены в результате использования теории распознавания образов и сравнительного анализа графики изменения относительных величин параметров токсичности от технического состояния свечей зажигания;

5. Предложен программно-аппаратный комплекс тестового диагностирования для реализации методики поиска неисправностей элементов системы зажигания при селективном отборе проб отработавших газов в ДВС.

Отличия полученных результатов исследований от известных (согласно проблематике) заключаются в следующем:

а) установлена зависимость параметров состава и содержания вредных веществ в ОГ с техническим состоянием элементов системы зажигания в отдельных цилиндрах двигателя;

б) разработаны методология, алгоритм и технология диагностирования системы зажигания по параметрам токсичности ОГ при тестовых режимах контроля.

Отличительной особенностью новых результатов исследований является установление частных зависимостей изменения концентрации токсичных компонентов в ОГ от технического состояния свечей зажигания с учетом влияния других систем ДВС.

Заключение

Установлена зависимость параметров состава и содержания вредных веществ в ОГ от технического состояния элементов системы зажигания в отдельных цилиндрах ДВС. Разработана математическая модель изменения вторичного напряжения в зависимости от искрового межэлектродного зазора свечи зажигания. Установлена взаимосвязь пробивного напряжения в межэлектродном зазоре свечи зажигания и плотности воздуха в камере испытательного прибора. На базе разработанных методик создана методология комплексного определения технического состояния свечей зажигания в двигателях автомобилей ВАЗ и ГАЗ по результа-

там анализа состава ОГ на сравнительных номограммах. Получены зависимости изменения относительной величины выходных диагностических параметров от значения зазора свечи зажигания на основе использования теории сравнительного анализа. Предложен программно-аппаратный комплекс тестового диагностирования с целью реализации методики поиска неисправностей элементов системы зажигания при селективном отборе проб ОГ бензинового двигателя. В практической работе необходимо адаптировать приборные и стендовые средства для проверки научных предположений на других моделях ДВС, доработать приспособления и оснастку необходимые для реализации нового метода диагностирования, проработать совокупность экспериментальных методик и провести их апробацию. Разработать подробные алгоритмы, позволяющие методом распознавания образов быстро отыскивать комбинации неисправностей. Получить результаты сравнения различных вариантов забора проб отработавших газов и их влияние на чувствительность и точность диагностирования системы зажигания. Оформить новизну исследований патентными и программными разработками.

Ценность данного исследования для науки и практики заключается в раскрытии взаимосвязи между зазором свечи зажигания и параметрами токсичности отработавших газов при проведении газоанализа методом селективного отбора пробы. Разработана новая методика диагностирования системы зажигания, которая состоит в контроле относительных величин параметров токсичности при реализации тестового метода отключения от-

дельных цилиндров и их циклов в процессе диагностирования.

Практическая значимость работы заключается в возможности непрерывного контроля элементов системы зажигания тестовым методом, в частности свечей системы зажигания, учитывая индивидуальный вклад каждой свечи на процесс выпуска и содержание параметров токсичности в отработавших газах. Чувствительность и достоверность современных методов контроля системы зажигания при помощи мотор-тестеров находится на низком уровне, т.к. на форму выходной осциллограммы влияет множество весомых факторов, таких как: наводки в измерительные цепи от самой системы зажигания, погрешности измерений, необходимость частой тарировки измерительных каналов. Классические способы контроля систем зажигания не позволяют акцентировать нагрузку на отдельный элемент и вывести его на экстремальный режим работы, при котором проявляются, с высокой эффективностью, скрытые отказы.

В качестве рекомендаций – результаты исследований могут быть использованы научно-исследовательскими, ремонтными, автообслуживающими организациями при определении неисправностей основных систем ДВС. Результаты экспериментальных исследований и их производственное внедрение позволяют рекомендовать разработанный метод при диагностировании технического состояния как системы зажигания ДВС, так и других его систем. Дальнейшие исследования по данной теме целесообразно распространить на другие марки автомобилей, а также газомоторные установки с элементами автоматизирования процесса диагностирования.

Литература

1. Вертей М. Л. Обоснование способа разгона двигателя с принудительным впрыском топлива и электрическим управлением топливopодачей при проведении тестового диагностирования // Вестник Алтайского ГАУ. 2015. № 2(124). С. 112–116.
2. Гриценко А. В., Цыганов К. А. Диагностирование электрических бензонасосов автомобилей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2013. – № 4. – С. 22–23.
3. Зеер В. Влияние способа отключения части цилиндров на показатели поршневых двигателей // Вестник КрасГАУ. 2007. – № 2. – С. 233–237.
4. Зеер В., Мартынов А. Способ улучшения топливно-экономических и экологических показателей автотранспортных средств // Вестник Иркутского ГТУ. – 2008. – № 1 (33). – С. 71–75.
5. Злотин Г. Н., Федянов Е. А. Начальный очаг горения при искровом зажигании гомогенных топливовоздушных объемах : монография. Волгоград: ВолгГТУ, 2008. – 152 с.
6. Интенсификация процессов воспламенения и горения углеводородных топлив при их искровом зажигании / Е. А. Захаров [и др.]: монография. – Волгоград: ВолгГТУ, 2017. – 136 с.
7. Исследование способа повышения экологичности и экономичности автотранспорта на тестовых режимах холостого хода работы двигателя внутреннего сгорания / А. В. Гриценко [и др.] // Транспорт Урала. – 016. – № 1(48). – С. 97–102.
8. Королев А. Е. Режимы обкатки и надёжность двигателей // Инновации. Наука. Образование. – 2020. – № 17. – С. 21–26.
9. Невзоров В. В., Овчинников В. М. Влияние технического состояния цилиндропоршневой группы и качественного состава отработавших газов на эффективность безразборного экспресс-восстановления транспортных двигателей // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2010. – № 2(21). – С. 144–148.

10. Новый метод, средство и программная среда для тестирования ЭМФ автомобиля / А. В. Гриценко [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2014. – № 18(145). – С. 53–56.
11. Создание мобильного диагностического комплекса на основе статистических исследований экологических и технических показателей автомобилей в процессе их эксплуатации / В. В. Невзоров [и др.] // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2007. – № 3(16). – С. 6–14.
12. Теоретическое обоснование диагностирования цилиндропоршневой группы в режиме прокрутки двигателя стартером: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. «Пром-Инжиниринг» / А. В. Гриценко [и др.] – Челябинск: ЮУрГУ, 2016. – С. 114–117.
13. Федянов Е. А., Кустов И. А. Сравнение эффективности метода отключения цилиндров как способа повышения эксплуатационной топливной экономичности двигателей с искровым зажиганием и дизелей // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2018. – № 4(25). – С. 27–30.
14. Францев С. М., Кавторев А. Ю. Микропроцессорная система исследования распределения значений пробивных напряжений системы зажигания ДВС // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2(49). – С. 55.
15. Францев С. М., Никонов А. Н. Алгоритм фиксации пробивных напряжений в системе зажигания ДВС на базе емкостного делителя напряжения // Дневник науки. – 2019. – № 3(27). – С. 46.
16. Экспериментальные исследования технического состояния цилиндропоршневой группы в режиме прокрутки двигателя стартером: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. «Пром-Инжиниринг» / А. М. Плаксин [и др.] // Челябинск: ЮУрГУ, 2016. – С. 111–113.
17. Экспертная система контроля технического состояния автомобилей / А. Д. Шумилин [и др.] // Научное обозрение. – 2016. – № 4. – С. 85–89.
18. Abas M. and Martinez-Botas R. (2015) Engine Operational Benefits with Cylinder Deactivation in Malaysian Urban Driving Conditions. SAE Technical Paper 2015-01-0983, <https://doi.org/10.4271/2015-01-0983>.
19. Araújo Porto F. et al. (2006) Study of utilization of petrol engine equipped with exhaust gas recirculation (EGR) and catalytic converter to reduce consumption and NOx emission. SAE Technical Paper 2006-01-2809, <https://doi.org/10.4271/2006-01-2809>.
20. Bemman Y. et al. (2005) Passive Exhaust System With Cylinder Deactivation. SAE Technical Paper 2005-01-2351, <https://doi.org/10.4271/2005-01-2351>.
21. Connolly F. (1994) Direct Estimation of Cyclic Combustion Pressure Variability Using Engine Speed Fluctuations in an Internal Combustion Engine. SAE Technical Paper 940143, <https://doi.org/10.4271/940143>.
22. Edward R., Radu R., and Mircea Z. (1999) Simulation of the Behavior of a Flow Control Device for the High Pressure Fuel Injection Pump of a Spark Ignition Engine. SAE Technical Paper 1999-01-0562, <https://doi.org/10.4271/1999-01-0562>.
23. Joshi M. et al. (2018) Diesel Engine Cylinder Deactivation for Improved System Performance over Transient Real-World Drive Cycles. SAE Technical Paper 2018-01-0880, <https://doi.org/10.4271/2018-01-0880>.
24. Lapuerta M., Hernández J., and Armas O. (2000) Kinetic Modelling of Gaseous Emissions in a Diesel Engine. SAE Technical Paper 2000-01-2939, <https://doi.org/10.4271/2000-01-2939>.
25. Rovai F., Ferrarese A., and Sinatora A. (2004) Electrical Automotive Fuel Pump Resistance Against E60 Gasoline-Ethanol Blend. SAE Technical Paper 2004-01-3277, <https://doi.org/10.4271/2004-01-3277>.
26. Senapati U., McDevitt I., and Hankinson A. (2011) Vehicle Refinement Challenges for a Large Displacement Engine with Cylinder Deactivation Capability. SAE Technical Paper 2011-01-1678, <https://doi.org/10.4271/2011-01-1678>.

References

1. Verthey, M. L. (2015) [Substantiation of the method of engine acceleration with forced fuel injection and electric fuel supply control during test diagnostics]. *Vestnik Altayskogo GAU* [Bulletin of the Altai State University]. Vol. 2(124), pp. 112–116. (In Russ.).
2. Gritsenko, A. V., Tsyganov, K. A. (2013) [Diagnostics of electric gasoline pumps of cars]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva* [Mechanization and electrification of agriculture]. Vol. 4, pp. 22–23. (In Russ.).
3. Zeer, V. (2007) [The effect of the method of disconnecting a part of the cylinders on the performance of piston engines]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU]. Vol. 2, pp. 233–237. (In Russ.).
4. Zeer, V., Martynov, A. (2008) [A way to improve fuel-economic and environmental indicators of motor vehicles]. *Vestnik Irkut'skogo GTU* [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. Vol. 1 (33), pp. 71–75. (In Russ.).
5. Zlotin, G. N., Fedyanov, E. A. (2008) *Nachal'nyy ochag goreniya pri iskrovom zazhiganii gomogennykh toplivovozdushnykh ob'yemakh* [The initial combustion hearth during spark ignition of homogeneous fuel-air volumes]. Volgograd: VolgSTU, 152 p.
6. Zakharov, E. A. (2017) *Intensifikatsiya protsessov vosplamneniya i goreniya uglevodородnykh topliv pri*

ikh iskrovom zazhiganii [Intensification of the ignition and combustion processes of hydrocarbon fuels during their spark ignition]. monograph. – Volgograd VolgSTU, 136 p.

7. Gritsenko, A. V. (2016) [Investigation of the method of increasing the environmental friendliness and efficiency of motor transport in the test modes of idling of the internal combustion engine]. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. Vol. 1(48), pp. 97–102. (In Russ.).

8. Korolev, A. E. (2020) [Running-in modes and engine reliability]. *Innovatsii. Nauka. Obrazovaniye* [Innovation. The science. Education]. Vol. 17, pp. 21–26. (In Russ.).

9. Nevzorov, V. V., Ovchinnikov, V. M. (2010) [The influence of the technical condition of the cylinder piston group and the qualitative composition of exhaust gases on the efficiency of non-disassembled express recovery of transport engines]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta : Nauka i transport* [Bulletin of the Belarusian State University of Transport : Science and Transport]. Vol. 2(21), pp. 144–148. (In Russ.).

10. Gritsenko, A. V. (2014) [A new method, tool and software environment for testing car EMF]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of the Volgograd State Technical University]. Vol. 18(145), pp. 53–56. (In Russ.).

11. Nevzorov, V. V. (2007) [Creation of a mobile diagnostic complex based on statistical studies of environmental and technical indicators of cars during their operation]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University]. Vol. 3(16), pp. 6–14. (In Russ.).

12. Gritsenko, A. V. (2016) [Theoretical justification for diagnosing a cylinder-piston group in the engine scrolling mode with a starter]. *Materialy II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Prom-Inzhiniring»* [Materials of the II International Scientific and Technical conf. “Prom-Engineering”]. Chelyabinsk: SUSU, pp. 114–117. (In Russ.).

13. Fedyanov, E. A., Kustov, I. A. (2018) [Comparison of the effectiveness of the cylinder shutdown method as a way to increase the operational fuel efficiency of spark-ignition engines and diesels]. *Energo- i resursoberezheniye: promyshlennost' i transport* [Energy and resource conservation: industry and Transport]. Vol. 4(25), pp. 27–30. (In Russ.).

14. Frantsev, S. M., Kavtorev, A. Yu. (2018) [Microprocessor system for studying the distribution of values of breakdown voltages of the internal combustion engine ignition system]. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. Vol. 2(49), pp. 55. (In Russ.).

15. Frantsev, S. M., Nikonov, A. N. (2019) [Algorithm for fixing breakdown voltages in the ignition system of an internal combustion engine based on a capacitive voltage divider]. *Dnevnik nauki* [Diary of Science]. Vol. 3(27), pp. 46. (In Russ.).

16. Plaksin, A. M. (2016) [Experimental studies of the technical condition of the cylinder piston group in the engine scrolling mode by the starter]. *materialy II Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. «Prom-Inzhiniring»* [Materials of the II International Scientific and Technical conf. “Prom-Engineering”]. Chelyabinsk: SUSU, pp. 111–113. (In Russ.).

17. Shumilin, A. D. (2016) Expert system for monitoring the technical condition of cars. *Scientific Review*. Vol. 4, pp. 85–89. (In Engl.).

18. Abas, M., Martinez-Botas, R. (2015) Engine Operational Benefits with Cylinder Deactivation in Malaysian Urban Driving Conditions. *SAE Technical Paper 2015-01-0983*, <https://doi.org/10.4271/2015-01-0983>.

19. Araújo, Porto F., Bailona, B., Camargo, J., Balestieri, J. et al. (2006) Study of utilization of petrol engine equipped with exhaust gas recirculation (EGR) and catalytic converter to reduce consumption and NOx emission. *SAE Technical Paper 2006-01-2809*, <https://doi.org/10.4271/2006-01-2809>.

20. Bemman, Y., Frei, T., Jones, C., Keck, M. (2005) Passive Exhaust System With Cylinder Deactivation. *SAE Technical Paper 2005-01-2351*, <https://doi.org/10.4271/2005-01-2351>.

21. Connolly, F (1994) Direct Estimation of Cyclic Combustion Pressure Variability Using Engine Speed Fluctuations in an Internal Combustion Engine. *SAE Technical Paper 940143*, <https://doi.org/10.4271/940143>.

22. Edward, R., Radu, R., Mircea, Z. (1999) Simulation of the Behavior of a Flow Control Device for the High Pressure Fuel Injection Pump of a Spark Ignition Engine. *SAE Technical Paper 1999-01-0562*, <https://doi.org/10.4271/1999-01-0562>.

23. Joshi, M., Gosala, D., Allen, C., Srinivasan, S. et al. (2018) Diesel Engine Cylinder Deactivation for Improved System Performance over Transient Real-World Drive Cycles. *SAE Technical Paper 2018-01-0880*, <https://doi.org/10.4271/2018-01-0880>.

24. Lapuerta, M., Hernández, J., Armas, O. (2000) Kinetic Modelling of Gaseous Emissions in a Diesel Engine. *SAE Technical Paper 2000-01-2939*, <https://doi.org/10.4271/2000-01-2939>.

25. Rovai, F., Ferrarese, A., Sinatora, A. (2004) Electrical Automotive Fuel Pump Resistance Against E60 Gasoline-Ethanol Blend. *SAE Technical Paper 2004-01-3277*, <https://doi.org/10.4271/2004-01-3277>.

26. Senapati, U., McDevitt, I., Hankinson, A. (2011) Vehicle Refinement Challenges for a Large Displacement Engine with Cylinder Deactivation Capability. *SAE Technical Paper 2011-01-1678*, <https://doi.org/10.4271/2011-01-1678>.

Информация об авторах:

Александр Владимирович Гриценко, доктор технических наук, профессор кафедры автомобильного транспорта, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет); профессор кафедры технического сервиса машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности, Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия

Author ID: 664171, **ORCID ID:** 0000-0002-7652-7912, **Scopus ID:** 57170082100, **Web of Science Researcher ID:** ABG-3945-2021
e-mail: alexgrits13@mail.ru

Константин Вячеславович Глемба, кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник кафедры автомобильного транспорта, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет); доцент кафедры эксплуатации машинно-тракторного парка, и технологии и механизации животноводства, Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия

Author ID: 643307, **ORCID ID:** 0000-0001-7212-5388, **Scopus ID:** 57170709100
e-mail: glemba77@mail.ru

Григорий Николаевич Салимоненко, руководитель проектов департамента управления проектами и инвестициями по развитию, ООО «ОМГ СДМ», Челябинск, Россия

e-mail: salimonenkog@mail.ru

Вклад соавторов:

Гриценко А. В. – теоретические исследования, методология, системный подход, проблематика, анализ теоретических исследований и обработка результатов эксперимента (50%).

Глемба К. В. – анализ теоретических исследований и обработка результатов эксперимента (25%).

Салимоненко Г. Н. – анализ теоретических исследований и обработка результатов эксперимента (25%).

Статья поступила в редакцию: 26.02.2022; принята в печать: 19.08.2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

Alexander Vladimirovich Gritsenko, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automobile Transport, South Ural State University (NIU); Professor of the Department of Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety, South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

Author ID: 664171, **ORCID ID:** 0000-0002-7652-7912, **Scopus ID:** 57170082100, **Web of Science Researcher ID:** ABG-3945-2021
e-mail: alexgrits13@mail.ru

Konstantin Vyacheslavovich Glemba, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Researcher of the Department of Automobile Transport, South Ural State University (NIU); Associate Professor of the Department of Operation of the Machine and Tractor Fleet, and Technology and Mechanization of Animal Husbandry, South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

Author ID: 643307, **ORCID ID:** 0000-0001-7212-5388, **Scopus ID:** 57170709100
e-mail: glemba77@mail.ru

Grigory Nikolaevich Salimonenko, Project Manager of the Project Management and Investment Development Department, OMG SDM LLC, Chelyabinsk, Russia

e-mail: salimonenkog@mail.ru

Contribution of the authors:

Gritsenko A. V. – theoretical studies, methodology, systematic approach, problems, analysis of theoretical studies and processing of experimental results (50%).

Glemba K. V. – analysis of theoretical studies and processing of experimental results (25%).

Salimonenko G. N. – analysis of theoretical studies and processing of experimental results (25%).

The paper was submitted: 26.02.2022.

Accepted for publication: 19.08.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.