

Расчет и конструирование

УДК 629.083

DOI: 10.14529/engin200201

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ТЕСТОВОЕ ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЫХОДНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДВИГАТЕЛЯ

**А.В. Гриценко, Г.Н. Салимоненко, В.Д. Шепелев,
Е.В. Шепелева, И.Д. Алферова**

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

В современном транспорте экологический контроль приобретает ключевую роль при формировании стратегии управления техническим состоянием узлов и систем. Первым этапом в уменьшении токсичности выбросов отработавших газов явилось введение норм ЕВРО, последовательно с ЕВРО-0 до ЕВРО-6. Нормы ЕВРО в системах выпуска отработавших газов привели к появлению каталитических нейтрализаторов, которые дезактивировали большую часть вредных выбросов. Ключевую роль также стали играть датчики кислорода, при установке которых появилась обратная связь. Таким образом, мировое автомобилестроение приблизилось к возможности управления выходными параметрами двигателя. Однако для этого имеется недостаточное количество параметров, рабочих режимов и дополнительных элементов контроля. В представленных исследованиях использован новый метод селективного контроля отработавших газов в каждом отдельном цилиндре. Основой применения метода стало приборное средство для обеспечения тестовых режимов диагностирования – догрузатель бензиновых двигателей ДБД-4. Подготовлена экспериментальная установка с доработкой системы выпуска отработавших газов. В выпускном коллекторе были предусмотрены точки для индивидуального забора проб отработавших газов с охлаждением зонда газоанализатора. Для контроля использовались параметры: частота вращения коленчатого вала, полное и частичное (поцикловое) отключение цилиндров, O_2 , CO , CO_2 , CH . Режим обеспечивался числом отключенных рабочих циклов двигателя и частотой вращения коленчатого вала. Управление осуществлялось внутренней коррекцией топливоподачи при воздействии на длительность впрыска электромагнитной форсунки. При проведении исследований были установлены минимальные значения параметров токсичности отработавших газов при тестовых воздействиях. Данная методика с комбинацией режимов и параметров позволяет снизить токсичность отработавших газов и улучшить экономичность и эффективность эксплуатации автомобилей.

Ключевые слова: экология, экономичность, двигатель внутреннего сгорания, диагностирование.

Введение

С момента возникновения первого автомобиля появилась тенденция конструктивного совершенствования узлов и систем и, как следствие, улучшение основных выходных показателей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [1–5]. 10–20 лет назад основу парка автомобилей Европы и Америки составляли бензиновые и дизельные модели. На данном этапе машиностроения пока еще достаточно весом процент ДВС и в частности в России составляет почти 100 %. Непрерывный рост парка автомобилей в России приводит к соответствующему потреблению энергоресурсов. Наряду с возрастающей численностью электромобилей ДВС пока являются основой мирового транспортного парка [6]. И до момента полного перехода на электротранспорт следует существенное внимание уделить контролю экологических параметров ДВС [7, 8].

Лидеры сегодняшнего машиностроения активно выпускают новые концепты автомобилей и их ДВС. На новый концепт и его разработку тратится 1–2 года. Новый образец ДВС, как правило, проходит полноценные испытания только в эксплуатации, что занимает уже 3–10 лет. Но наряду с выпуском принципиально новых ДВС важно на практике контролировать, изучать и дорабаты-

Расчет и конструирование

вать уже существующие системы ДВС, а также встроенные и внешние средства их диагностирования, что является не менее сложной и значимой задачей [9].

Основные труды ведущих ученых в области экологии транспорта направлены на исследование процессов деактивации токсичных автомобильных газов, разработку перспективных элементов, узлов и систем выпуска отработавших газов (ОГ), а также на селективную корректировку подачи топлива при изменении технического состояния систем ДВС [10–12]. Эффективность этих решений доказана при эксплуатации абсолютно новых, не имеющих наработки систем автомобилей [13–15]. В проведенных исследованиях были взяты идеальные условия эксплуатации транспортных средств. Однако реалии эксплуатации показывают, что в большинстве случаев автовладельцы, автомобильные парки, автомобильные предприятия не имеют возможности обеспечить идеальные условия эксплуатации и обслуживания транспортных средств [16, 17]. Также высокая трудоемкость поиска неисправностей основных систем ДВС, влияющих на экологические показатели транспортных средств, подвигает к разработке новых методов поиска неисправностей для поддержания максимально высокого экологического класса автомобилей [18, 19].

Таким образом, целью исследования является совершенствование процесса диагностирования ДВС по параметрам селективного забора пробы ОГ отдельных цилиндров на тестовых режимах.

1. Теоретические исследования

Отсутствие средств диагностирования, достоверно определяющих факторы, влияющие на экологические показатели ДВС, приводит к большим затратам на поиск причин неисправностей (порядка 3000...7000 руб. на один автомобиль). На основании проведенного анализа существующих методов оценки факторов, влияющих на экологические показатели ДВС и износ основных систем ДВС, можно сделать вывод, что такие элементы, как цилиндропоршневая группа (ЦПГ), являются достаточно надежной системой и фактором износа ЦПГ можно пренебречь. Но при этом необходимо в арсенале иметь способ контроля технического состояния ЦПГ, желательно встроенный в систему управления ДВС, чтобы в любой момент времени иметь возможность контроля ЦПГ. Анализ отказов элементов ДВС показывает, что наибольшее их число приходится на электромагнитные форсунки, свечи зажигания, каталитический нейтрализатор (КН) ОГ. Кроме того, данные элементы существенно влияют на экологические показатели ДВС [20–22].

С учетом вышеописанного и выдвинутой цели научной работы были определены следующие задачи исследования.

1. Выявить взаимосвязь технического состояния элементов ДВС с параметрами токсичности.
2. Разработать метод оценки технического состояния элементов топливной аппаратуры – форсунок, системы зажигания – свечей и системы выпуска – каталитического нейтрализатора ОГ по параметрам токсичности при селективном отборе пробы ОГ.
3. Разработать диагностическое оборудование и экспериментально установить диагностические тестовые режимы и параметры контроля при исследовании технического состояния систем ДВС.
4. Обосновать методику диагностирования с применением разработанного оборудования, провести сравнительные исследования и показать их эффективность.

2. Методика исследований

При проведении экспериментальных исследований входными параметрами являются: 1) искровой промежуток свечи зажигания; 2) изменение пропускной способности электромагнитной форсунки; 3) сопротивление КН. Контролируемыми параметрами: температура охлаждающей жидкости ДВС, техническое состояние цилиндропоршневой группы (ЦПГ), газораспределительного механизма (ГРМ), температура масла. Выходными параметрами являются: частота вращения коленчатого вала ДВС, CO, CO₂, CH, O₂. После этого обработка данных проводилась в программном продукте SigmaPlot, верификация и сравнительные исследования с применением Excel и Mathcad.

С целью исследования взаимосвязи искрового промежутка свечи зажигания с напряжением ионизации были проведены исследования данного процесса. При этом искусственно устанавливались зазоры 0,5, 0,7 и 1,4 мм. Одновременно изменялась плотность воздуха в камере испытательного прибора с 7 до 20 кг/м³. После чего отслеживалось изменение приращения вторичного напряжения dU_2/dt , В/с (рис. 1).

Анализ данных на рис. 1 показывает, что при установке свечи зажигания с максимальным зазором 1,4 мм изменение вторичного напряжения достигает наибольших значений.

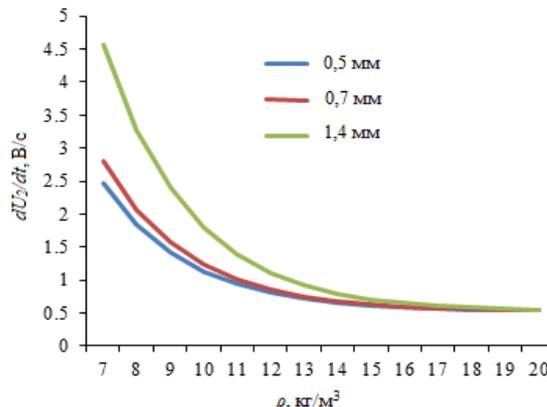


Рис. 1. Зависимость приращения вторичного напряжения dU_2/dt , В/с от плотности воздуха в камере испытательного прибора ρ , кг/м³ при различных зазорах в свече зажигания

Обобщенный анализ данных, приведенных на рис. 1, позволил установить взаимосвязи в виде уравнений:

$$\delta_{CB} = 0,526 + \exp\left(2,951 + 0,822 \frac{dU_2}{dt} - 0,386 \cdot \rho\right) \quad (1)$$

$$\delta_{CB} = 0,545 + \exp\left(2,937 + 0,475 \frac{dU_2}{dt} - 0,330 \cdot \rho\right), \quad (2)$$

где δ_{CB} – устанавливаемый зазор в свече системы зажигания, мм; dU_2/dt – скорость (приращение) изменения вторичного напряжения в катушке зажигания, кВ/мкс; ρ – плотность всасываемого воздуха в устанавливаемом зазоре свечи зажигания, кг/м³.

Представленные уравнения (1), (2) связывают приращение напряжения ионизации и плотность воздуха в камере испытательного прибора с пробивным зазором свечей зажигания.

Так, например, при межэлектродном зазоре 0,9 мм пробивное напряжение $U_{пр}$ (кВ) будет выше для меньшего изменения вторичного напряжения dU_2/dt (В/с) (рис. 2).

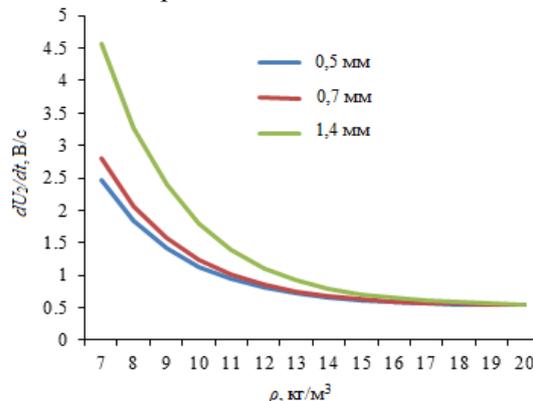


Рис. 2. Зависимость величины пробивного напряжения $U_{пр}$ (В) от плотности воздуха в камере испытательного прибора ρ (кг/м³) при различных величинах приращения вторичного напряжения dU_2/dt (В/с)

Проведенные аналитические исследования позволили установить, что предельным значением зазора свечи зажигания является зазор 1,1 мм в сторону увеличения и 0,3 мм в сторону уменьшения.

Совместный анализ предварительных экспериментов по исследованию взаимосвязи искрового промежутка свечи зажигания, изменения пропускной способности электромагнитной форсунки и сопротивления КН с параметрами токсичности ОГ показал их существенную взаимосвязь. Данные исследования позволили создать обобщенную математическую модель, учитывающую состав отработавших газов до КН с техническим состоянием свечей зажигания, электромагнитных форсунок и КН. Основные результаты после их комплексного анализа были представлены и описаны в виде пяти взаимовлияющих друг на друга функциональных зависимостей:

$$n = f(Z, F, R), \quad (3)$$

$$O_2 = f(Z, F, R), \quad (4)$$

$$CH = f(Z, F, R), \quad (5)$$

$$CO = f(Z, F, R), \quad (6)$$

$$CO_2 = f(Z, F, R), \quad (7)$$

Расчет и конструирование

где n – изменение частоты вращения коленчатого вала ДВС, мин^{-1} ; O_2 – содержание суммарной величины свободного кислорода в ОГ до каталитического нейтрализатора, %; CH – содержание суммарной величины углеводородов в ОГ до каталитического нейтрализатора, млн^{-1} ; CO – содержание суммарной величины оксида углерода до каталитического нейтрализатора, %; CO_2 – содержание суммарной величины диоксида углерода в ОГ до каталитического нейтрализатора, %; Z – установленный зазор свечи в системе зажигания, мм; F – установленная искусственно пропускная способность электромагнитной форсунки системы топливоподачи ДВС, %; R – установленное эквивалентное сопротивление КН системы выпуска, мм.

Суммарные данные сформированных таблиц при использовании функционалов (3)–(7) были обработаны при помощи программы MATLABSimulink. Расчетная модель представлена на рис. 3.

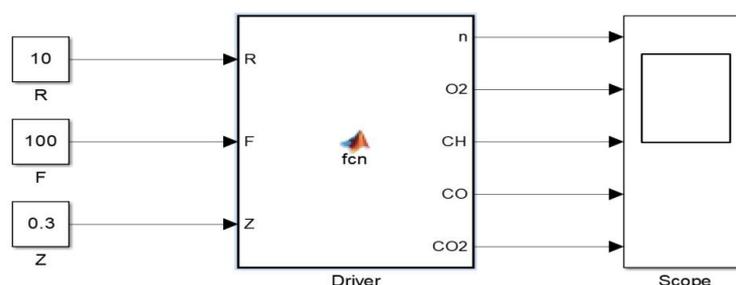


Рис. 3. Расчетная модель в программном продукте MATLABSimulink

При обработке данных в программе MATLABSimulink были получены зависимости различных выходных параметров в зависимости от комбинации трех входных. Так, на рис. 4 а и б показаны взаимосвязь содержания CO_2 (%) в ОГ системы выпуска от установленного искусственно эквивалентного обобщенного сопротивления КН R , мм, суммарной пропускной способности форсунки системы топливоподачи F (%), установленного зазора свечи системы зажигания Z (мм). На рис. 4 а показаны скомбинированные данные минимальных значений трех факторов: $R = 10$ мм, $F = 94$ %, $Z = 0,3$ мм; на рис. 4 б показаны скомбинированные данные максимальных значений трех факторов $R = 34$ мм, $F = 106$ %, $Z = 1,1$ мм.

Из рис. 4 а и б видно, что концентрация CO_2 возрастает с уменьшением эквивалентного сопротивления КН с 10 до 34 мм в КН. Концентрация CO_2 резко падает с увеличением пропускной способности электромагнитных форсунок с 94 до 106 %. И концентрация CO_2 возрастает при увеличении зазора свечи зажигания с 0,3 до 1,1 мм.

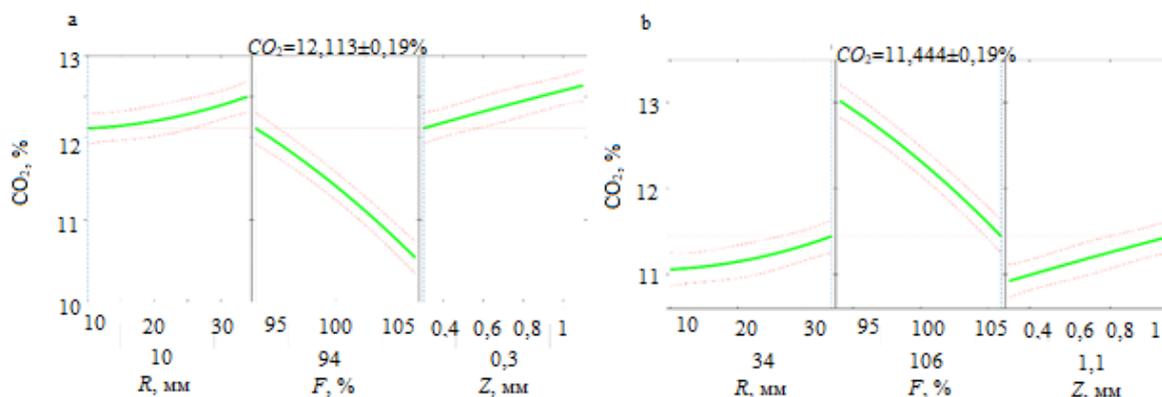


Рис. 4. Взаимосвязь содержания CO_2 , % в ОГ системы выпуска от установленного искусственно эквивалентного обобщенного сопротивления КН R , суммарной пропускной способности форсунки системы топливоподачи F , установленного зазора свечи системы зажигания Z

Аналогичным образом построены взаимосвязи содержания CO , %; CH , млн^{-1} ; O_2 , % в ОГ от установленного обобщенного эквивалентного сопротивления КН R , мм, суммарной пропускной

способности форсунки системы топливоподачи F , %, установленного зазора свечи системы зажигания Z , мм.

Проведем анализ взаимосвязи частоты вращения коленчатого вала ДВС n , мин^{-1} от установленного искусственно обобщенного эквивалентного сопротивления КН R , мм, суммарной пропускной способности форсунки системы топливоподачи F , %, установленного зазора свечи системы зажигания Z , мм (на рис. 5 а показано сочетание минимальных значений факторов: $R = 10$ мм, $F = 94$ %, $Z = 0,3$ мм; на рис. 5 б показано сочетание максимальных значений факторов: $R = 34$ мм, $F = 106$ %, $Z = 1,1$ мм).

Из рис. 5 а и б видно, что величина частоты вращения коленчатого вала ДВС существенно изменяется с варьированием установленного обобщенного сопротивления КН. Так, изменение параметра R , мм с 10 до 34 мм приводит к росту частоты вращения с 1800–2200 мин^{-1} до 3000–3200 мин^{-1} . При искусственном изменении суммарной пропускной способности форсунок системы топливоподачи с 94 до 106 % происходит увеличение частоты вращения в пределах 20–30 %. При варьировании зазора свечи системы зажигания в пределах 0,3–0,7 мм частота вращения снижается в пределах 100 мин^{-1} и растет на величину 100 мин^{-1} при изменении зазора с 0,7 до 1,1 мм.

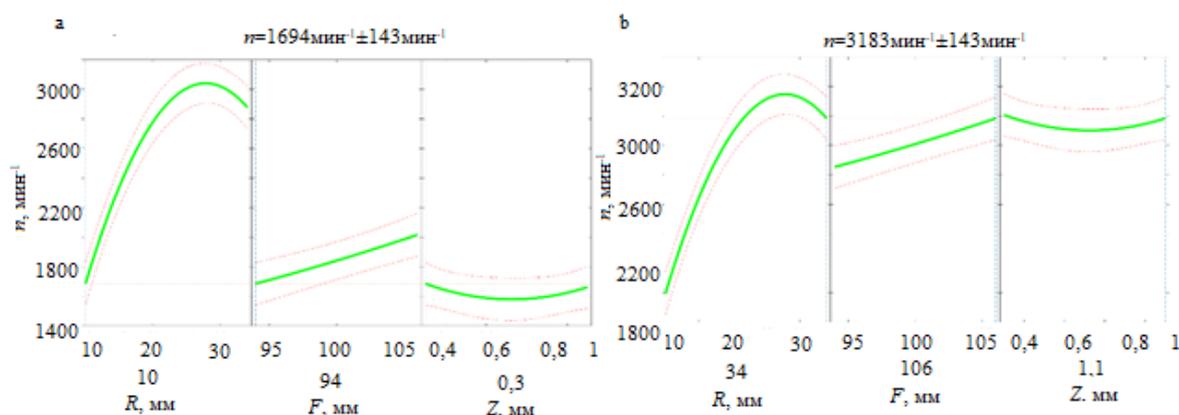


Рис. 5. Взаимосвязь изменения частоты вращения коленчатого вала ДВС n от установленного искусственного эквивалентного сопротивления КН R , суммарной пропускной способности форсунки системы топливоподачи F , установленного зазора свечи системы зажигания Z

3. Тепловой расчет исследуемого ДВС

Для анализа состава отработавших газов проведем тепловой расчет. Выберем исходные данные для расчета. Так, известно, что наша экспериментальная установка на базе ДВС автомобиля марки ВАЗ-2112 имеет степень сжатия $\varepsilon = 11$. При проведении экспериментов использовался бензин марки А-92. Кроме того, из справочных материалов были выбраны данные о обобщенном элементарном составе, к числу которых относятся водород $H = 0,145$ и углерод $C = 0,855$. А также принята молекулярная масса, которая для бензина марки А-92 составила $m_T = 115$ кг/кмоль. Расчет величины низшей теплоты сгорания бензина А-92 проведем по формуле:

$$H_u = 33,91C + 125,60H - 10,89(O - S) - 2,51(9H + W). \quad (8)$$

Для определения состава смеси топлива и его компонентов при сгорании определим теоретическое количество воздуха, которое достаточно и необходимо для полноценного сгорания 1 кг бензинового топлива, воспользуемся для этого формулой:

$$L_0 = \frac{1}{0,208} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right), \quad (9)$$

$$l_0 = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3}C + 8H - O \right). \quad (10)$$

В современных системах электронного управления качество и количество смеси строго задаются в установленных нормативных пределах. По обратной связи, которую обеспечивает датчик кислорода, электронным блоком управления отслеживается стехиометрический состав топливной смеси. Базовыми сигналами для формирования топливной порции являются количество воздуха на впуске и режим движения, определяемый нагрузкой и частотой вращения ДВС. С учетом сказанно-

Расчет и конструирование

го под текущий режим формируется коэффициент избытка воздуха, при котором должна быть обеспечена высокая эффективность процесса сгорания и нетоксичного выхлопа. В текущем расчете все параметры выбраны для инжекторной системы питания двигателя [23–25]. Возможность применения для рассчитываемого двигателя инжекторной системы питания позволяет несколько расширить диапазон используемой топливно-воздушной смеси, в расчетах принимаем состав смеси $\alpha = 0,7 \dots 1,3$. Данный диапазон характерен для большинства современных ДВС.

Необходимое количество топливно-воздушной смеси при $\alpha = 0,95$ определим по формуле:

$$M_1 = \alpha \cdot L_0 + \frac{1}{m_T}. \quad (11)$$

Учитывая, что процесс сгорания происходит равномерно, при полном сгорании топливно-воздушной смеси, то с учетом этого допущения количество дискретных компонентов ОГ системы выпуска при $K = 0,5$ можно определить из ряда выражений ниже:

$$M_{CO_2} = \frac{C}{12} + 2 \left(\frac{1-\alpha}{1+K} \right) \cdot 0,208 \cdot L_0, \quad (12)$$

$$M_{CO} = 2 \left(\frac{1-\alpha}{1+K} \right) \cdot 0,208 \cdot L_0, \quad (13)$$

$$M_{H_2O} = \frac{H}{12} - 2 \cdot K \left(\frac{1-\alpha}{1+K} \right) \cdot 0,208 \cdot L_0, \quad (14)$$

$$M_{H_2} = 2 \cdot K \left(\frac{1-\alpha}{1+K} \right) \cdot 0,208 \cdot L_0, \quad (15)$$

$$M_{N_2} = 0,792 \cdot \alpha \cdot L_0, \quad (16)$$

$$M_2 = M_{CO_2} + M_{CO} + M_{H_2O} + M_{H_2} + M_{N_2}. \quad (17)$$

Так как коэффициент избытка воздуха для искомого ДВС изменяется в пределах 0,7–1,3, то, подставляя эти значения с шагом 0,05 в выражения (12)–(17), получим зависимости (рис. 6).

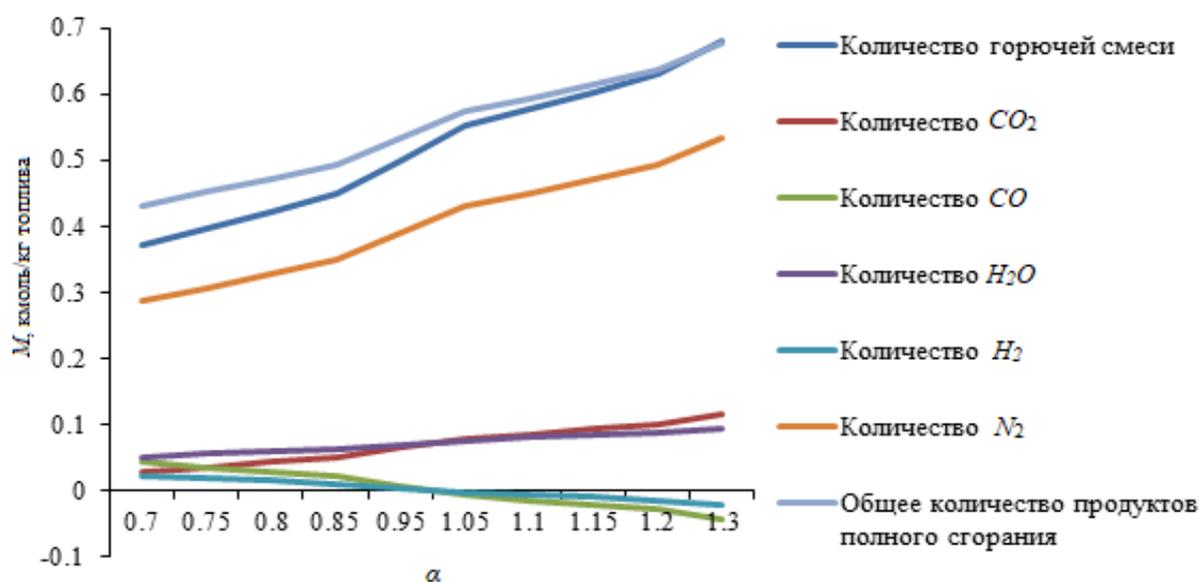


Рис. 6. Зависимость количества дискретных компонентов ОГ системы выпуска M от коэффициента избытка воздуха α

Из анализа графика на рис. 6 видно, что с увеличением коэффициента избытка воздуха α возрастает потребление горючей смеси, незначительно увеличиваются выбросы CO_2 и H_2O . Также увеличиваются выбросы NO_x за счет большего количества свободного кислорода и увеличенной температуры сгорания топлива, вследствие чего увеличивается количество молекулярного кислорода.

4. Выбор методики исследования

Для проведения всей запланированной комплексной работы была разработана методика исследований, в которую входило: 1) выбор необходимой экспериментальной установки; 2) выбор необходимого оборудования и дополнительных приборов контроля; 3) выбор режимов диагностирования и диагностических параметров. Выбор экспериментальной установки остановился на ДВС ВАЗ-2112 как наиболее распространенном в Российской Федерации. Экспериментальная установка и дополнительные приспособления представлены на рис. 7.

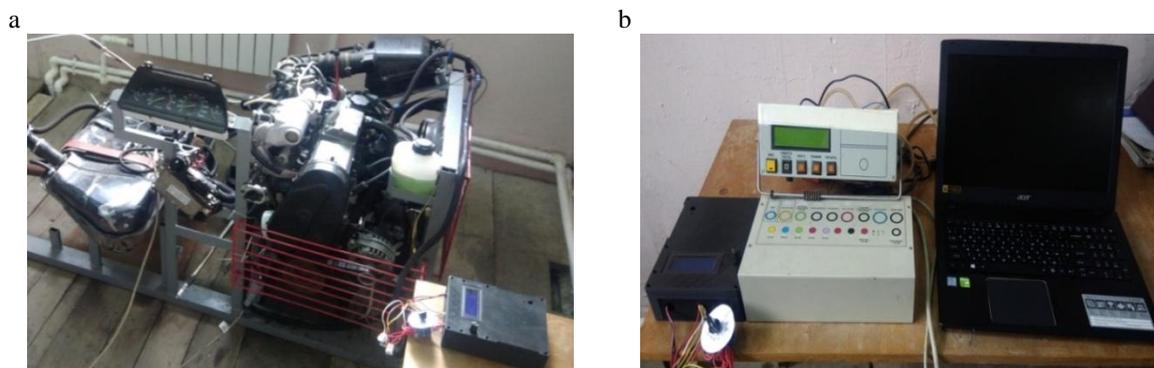


Рис. 7. а) экспериментальная установка, б) оборудование и дополнительные приборы контроля

Кроме того, выбрано основное оборудование: догрузатель бензинового двигателя ДБД-4 и 4 компонентный газоанализатор ИНФРАКАР М 2.01. Дополнительные приборы контроля необходимы были для контроля второстепенных параметров систем ДВС [15, 16]. К числу дополнительных приборов контроля можно отнести мотор-тестер МТ-10, персональный компьютер.

В системе выпуска ОГ в отдельных коллекторах показаны точки забора отработавших газов. В этих точках сделаны сверления и установлены гайки с переходниками для подсоединения к ним зонда газоанализатора. Причем это соединение делается через охладитель-змеевик для охлаждения ОГ до газоанализатора [26–28].

Далее по ходу системы выпуска показан λ -зонд. Затем идет каталитический нейтрализатор и глушитель. На конец глушителя для формирования искусственного сопротивления устанавливаются специальные шайбы. В разрыв электромагнитных форсунок подсоединяются провода прибора ДБД-4. ДБД-4 также связан с электронным блоком управления (ЭБУ) ДВС.

5. Результаты экспериментальных исследований.

Сравнительные испытания при разных вариантах забора ОГ

Дальнейшие испытания были сконцентрированы на сравнении разных вариантов забора ОГ. Для этого использовалась экспериментальная установка на базе ДВС ВАЗ-2112 (см. рис. 7 а). Измерения концентрации CO , CH , CO_2 и O_2 проводились тремя разными способами: 1) при работе 1-го цилиндра и заборе ОГ в общей выпускной трубе; 2) при работе всех четырех цилиндров и заборе ОГ в общей выпускной трубе; 3) при работе 1-го цилиндра и заборе ОГ в выпускном коллекторе сразу после выхода ОГ из цилиндра. Измерения проводились с дискретностью в 500 мин^{-1} , начиная с 1000 мин^{-1} .

В результате получена взаимосвязь содержания CO (%) в ОГ системы выпуска до КН от частоты вращения коленчатого вала ДВС n (мин^{-1}) (рис. 8).

Из данных рис. 8 видно, что при работе всех четырех цилиндров и заборе ОГ в общей выпускной трубе концентрация CO в ОГ достигает наибольших значений – от 9,4 до 10,2 %. Максимум проявляется в точке, соответствующей 4000 мин^{-1} . При работе 1-го цилиндра и заборе ОГ в выпускном коллекторе сразу после выхода ОГ из цилиндра CO достигает наибольшего значения при 1000 мин^{-1} – 4 %. С ростом частоты вращения CO падает, достигая при 5000 мин^{-1} – 1 %. При работе 1-го цилиндра и заборе ОГ в общей выпускной трубе CO принимает минимальное значение при 1000 мин^{-1} – 1,98 %. Далее CO держится на уровне не более 1 % с ростом частоты вращения коленчатого вала ДВС. Но это низкое значение CO объясняется перемешиванием свободного воздуха, поступающего на выпуск из соседних неработающих цилиндров.

Расчет и конструирование

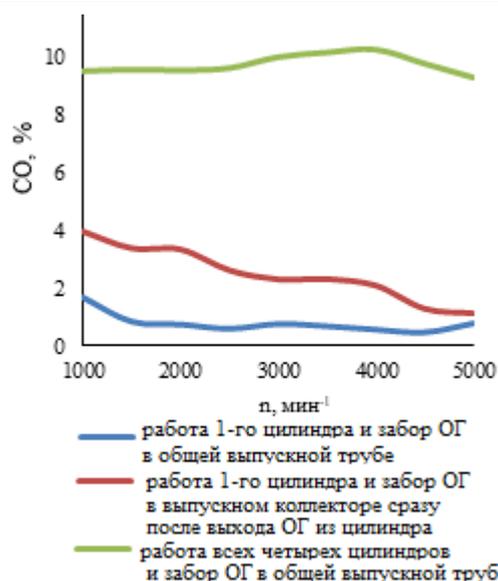


Рис. 8. Взаимосвязь содержания CO_2 в ОГ системы выпуска от частоты вращения коленчатого вала ДВС n при различных вариантах забора ОГ

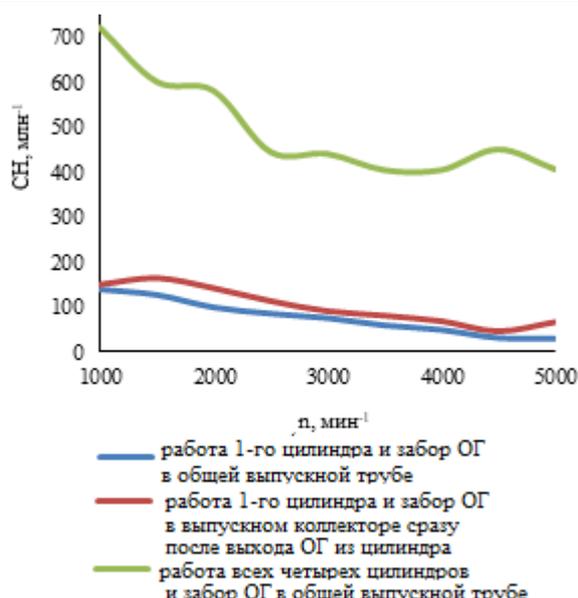


Рис. 9. Взаимосвязь содержания CH в ОГ системы выпуска от частоты вращения коленчатого вала ДВС n при различных вариантах забора ОГ

На основании экспериментальных данных была получена взаимосвязь содержания CH , $млн^{-1}$ в ОГ системы выпуска до КН от частоты вращения коленчатого вала ДВС n (рис. 9).

Анализ рис. 9 показывает, что существенно более высоких значений CH достигает при работе всех четырех цилиндров и заборе ОГ в общей выпускной трубе. Так, при 1000 мин^{-1} концентрация CH достигает максимума – 715 млн^{-1} . Далее с ростом частоты вращения коленчатого вала ДВС CH падает и составляет при 5000 мин^{-1} – 400 млн^{-1} . При работе 1-го цилиндра и заборе ОГ в общей выпускной трубе и работе 1-го цилиндра и заборе ОГ в выпускном коллекторе сразу после выхода ОГ из цилиндра наблюдаются практически идентичные результаты, различающиеся в пределах ошибки опыта.

Также по результатам эксперимента построена взаимосвязь содержания CO_2 , % в ОГ системы выпуска до КН от частоты вращения коленчатого вала ДВС n , $мин^{-1}$ (рис. 10).

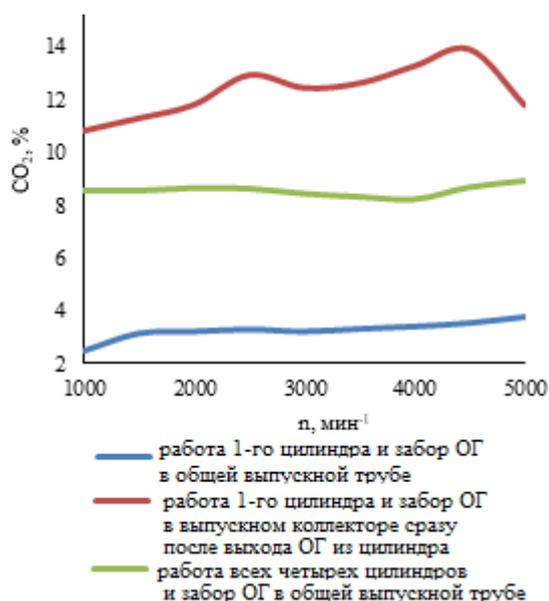


Рис. 10. Взаимосвязь содержания CO_2 в ОГ системы выпуска от частоты вращения коленчатого вала ДВС n при различных вариантах забора ОГ

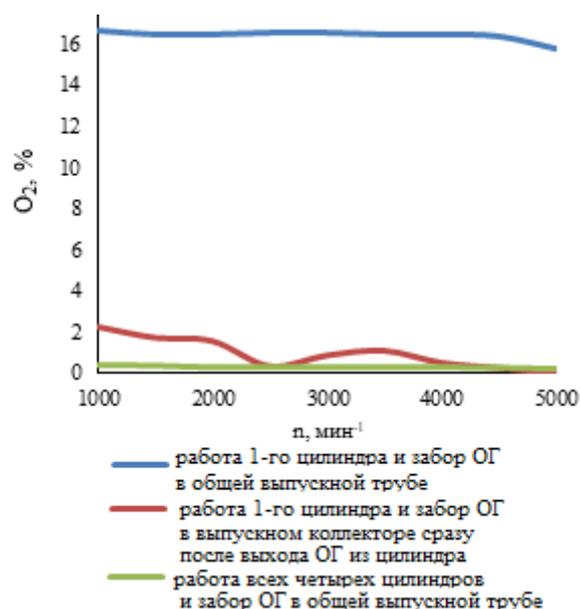


Рис. 11. Взаимосвязь концентрации O_2 в ОГ системы выпуска от частоты вращения коленчатого вала ДВС n при различных вариантах забора ОГ

Приведенные на рис. 10 графики при их сравнении показывают, что максимальное возможное изменение содержания CO_2 можно видеть при варианте работы 1-го цилиндра и осуществлении забора ОГ индивидуально (селективно) в выпускном коллекторе сразу после выхода ОГ из рабочего цилиндра. Например, в начальной точке контроля при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ содержание CO_2 составляет 10,7 %. Затем по мере увеличения частоты вращения с 1000 до 4500 мин^{-1} CO_2 также заметно увеличивается и достигает максимального значения, равного 14 %. При работе всех четырех цилиндров и заборе ОГ в общей выпускной трубе наблюдается несколько меньшее значение CO_2 . Это объясняется свободным кислородом, поступающим из соседних цилиндров при отсутствии сгорания в них. И самое меньшее значение CO_2 наблюдается при работе 1-го цилиндра и заборе ОГ в общей выпускной трубе. Также существенное влияние оказывает свободный кислород из соседних цилиндров при отсутствии сгорания в них.

По результатам эксперимента построена взаимосвязь содержания O_2 , % в ОГ системы выпуска от частоты вращения коленчатого вала ДВС n (мин^{-1}) (рис. 11).

Анализируя рис. 11, видим, что наибольших значений концентрация O_2 достигает при работе 1-го цилиндра и заборе ОГ в общей выпускной трубе, концентрация O_2 составляет в среднем 16,2 %. Тогда как при работе 1-го цилиндра и заборе ОГ в выпускном коллекторе сразу после выхода ОГ из цилиндра и работе всех четырех цилиндров и заборе ОГ в общей выпускной трубе концентрация O_2 находится на уровне ниже 2 %. Это также объясняется влиянием свободного кислорода из соседних цилиндров на результат контроля.

6. Эксплуатационные испытания

В результате эксплуатационных испытаний были получены сравнительные номограммы определения технического состояния электромагнитных форсунок, каталитического нейтрализатора и свечей зажигания автомобилей ВАЗ по результатам анализа состава ОГ. За 100 % было принято максимальное значение изменения регистрируемого параметра в сторону увеличения или уменьшения. Нулевое значение взято при эталонном состоянии элементов, указанном заводом-изготовителем. Относительные величины параметров удобно рассматривать в %. На выходе контролировались следующие параметры: содержание CO , содержание CO_2 , содержание CH , содержание O_2 и частота вращения коленчатого вала ДВС n . Эти параметры измеряются разными величинами, но в % очень удобно производить их сравнение (рис. 12).

Из рис. 12 видно, что наибольшее изменение принимают параметры CH и O_2 . Концентрация CH весомерно возрастает с увеличением пропускной способности электромагнитной форсунки. Концентрация же O_2 , наоборот, существенно снижается с увеличением пропускной способности электромагнитной форсунки.

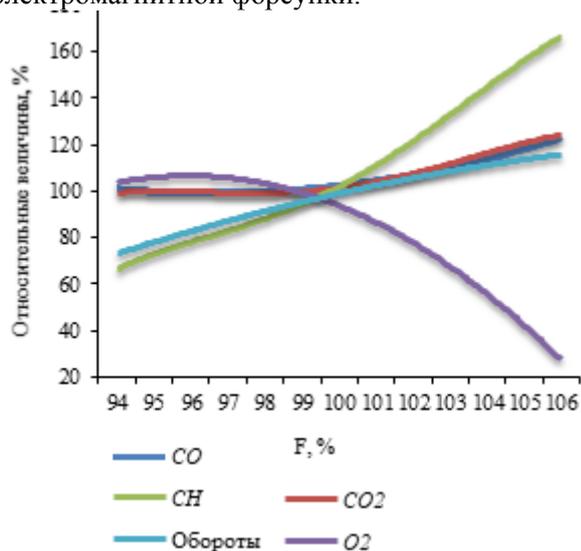


Рис. 12. Комплексная зависимость относительных величин контролируемых параметров содержания CO , CO_2 , CH , O_2 и частоты вращения коленчатого вала ДВС n от обобщенной пропускной способности форсунки F (для ДВС ВАЗ)

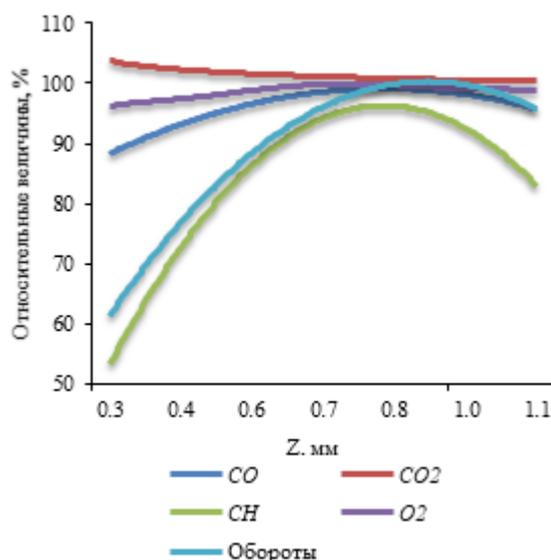


Рис. 13. Комплексная зависимость относительных величин контролируемых параметров содержания CO , CO_2 , CH , O_2 и частоты вращения коленчатого вала ДВС n от зазора свечи зажигания Z (мм) (для ДВС ВАЗ)

Расчет и конструирование

Частота вращения коленчатого вала ДВС практически линейно возрастает с увеличением обобщенной пропускной способности электромагнитной форсунки. Параметры CO и CO_2 начинают весомерно возрастать при изменении F от 100 до 106 %, когда поступает богатая топливно-воздушная смесь.

Рассмотрим комплексную зависимость относительных величин контролируемых параметров содержания CO , содержания CO_2 , содержания CH , содержания O_2 и частоты вращения коленчатого вала ДВС n от зазора свечи зажигания Z (мм) (для ДВС ВАЗ) (рис. 13).

Анализ рис. 13 показывает, что наибольших изменений достигают параметры CH и частота вращения коленчатого вала ДВС. Причем с ростом величины зазора в свече зажигания параметры CH и n резко возрастают до значения $Z = 0,8$ мм.

Затем наблюдается точка перегиба и их значения уменьшаются. Значения CO и O_2 возрастают с увеличением Z , но при $Z = 0,8$ мм рост замедляется.

Рассмотрим комплексную зависимость относительных величин контролируемых параметров содержания CO , содержания CO_2 , содержания CH , содержания O_2 и частоты вращения коленчатого вала ДВС n от эквивалентного сопротивления каталитического нейтрализатора R (мм) (для ДВС ВАЗ) (рис. 14).

Анализ рис. 14 показывает, что наибольшие изменения происходят у параметров CO и n . Концентрация CO увеличивается с ростом эквивалентного сопротивления каталитического нейтрализатора. В то же время значение n наоборот резко падает с ростом эквивалентного сопротивления каталитического нейтрализатора.

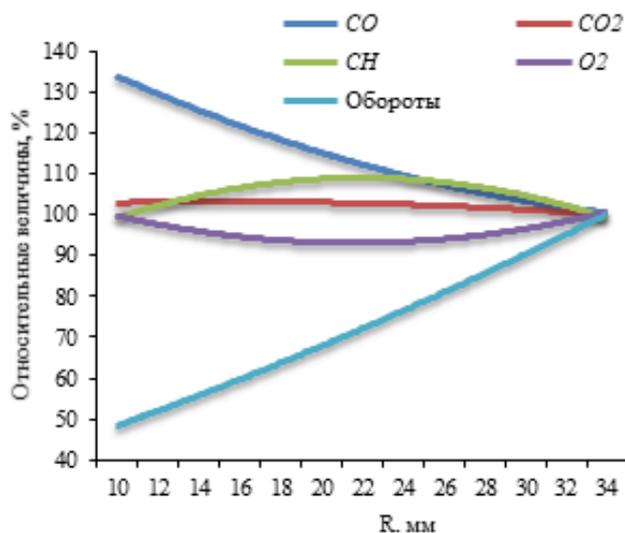


Рис. 14. Комплексная зависимость относительных величин контролируемых параметров содержания CO , CO_2 , CH , O_2 и частоты вращения коленчатого вала ДВС n от эквивалентного сопротивления каталитического нейтрализатора R (мм) (для ДВС ВАЗ)

Параметры CH , CO_2 и O_2 не так заметно изменяются, но имеют явные максимумы, минимумы в области $R = 22$ мм.

Выводы

Таким образом, в завершающей части исследований следует сказать, что разработанный новый метод селективного контроля токсичности ОГ обладает большей чувствительностью к изменению технического состояния систем питания, зажигания и выпуска. Более достоверная оценка технического состояния систем ДВС приведет к снижению ошибок при диагностировании. Это в конечном итоге отразится снижением себестоимости эксплуатации автомобиля, годовая экономия по предварительным расчетам составит в пределах 699700–855200 рублей на один диагностический пост. Данный метод рекомендуется к применению многочисленным автообслуживающим и авторемонтным предприятиям, а также автомобильным заводам.

Литература

1. Magaril, E.R. Specific features of combustion in gasoline-driven internal combustion engines / E.R. Magaril, R.Z. Magaril, V.G. Bamburov // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2014. – V. 50. – Iss. 1. – P. 75–79.
2. Czech, P. Diagnosing of Car Engine Fuel Injectors Damage Using DWT Analysis and PNN Neural Networks / P. Czech, H. Bąkowski // *Transport Problems*. – 2013. – V. 8. Iss. 3. – P. 85–91.
3. Мацкерле, Ю. Современный экономичный автомобиль / Ю. Мацкерле. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
4. Давлетова, Н.Х. Автотранспорт как глобальный источник загрязнения атмосферного воздуха / Н.Х. Давлетова // *Современные наукоемкие технологии*. – 2005. – № 4. – С. 90.
5. Амбарцумян, В.В. Экологическая безопасность автомобильного транспорта / В.В. Амбарцумян, В.Б. Носов, В.И. Тагасов. – М.: ООО Изд-во «Научтехлитиздат», 1999. – 324 с.
6. Nyberg, M. Model-based diagnosis of an automotive engine using several types of fault models / M. Nyberg // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. – 2002. – V. 10(5). – P. 679–689. DOI:10.1109/TCST.2002.801873
7. Исследование экологических параметров бензинового ДВС при имитации различных режимов нагружения / А.В. Гриценко, К.В. Глемба, О.Н. Ларин и др. // *Транспорт Урала*. – 2018. – № 3 (58). – С. 58–63.
8. Челноков, А.А. Основы промышленной экологии / А.А. Челноков, Л. Ф. Ющенко. – Минск: Выш. шк., 2001. – 343 с.
9. Hsu, P. Diagnosis of multiple sensor and actuator failures in automotive engines / P. Hsu, K. Lin, L. Shen // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 1995. – V. 44(4). – P. 779–789. DOI:10.1109/25.467962
10. Gritsenko, A.V. Diagnostics of friction bearings by oil pressure parameters during cycle-by-cycle loading / A.V. Gritsenko, E.A. Zadorozhnaya, V.D. Shepelev // *Tribology in Industry*. – 2018. – V. 40. – Iss. 2. – P. 300–310.
11. Развитие технических средств диагностирования тракторных ДВС по параметрам рабочих процессов / О.Ф. Савченко, В.В. Альт, С.Н. Ольшевский, И.П. Добролюбов // *Труды ГОСНИТИ*. – 2015. – Т. 118. – С. 106–112.
12. Экспертная система контроля технического состояния автомобилей / А.Д. Шумилин, В.В. Лянденбургский, М.К. Капунова и др. // *Научное обозрение*. – 2016. – № 4. – С. 85–89.
13. Техническая эндоскопия двигателей автомобилей / Е. Агеев, А. Щербаков, А. Агеев, А. Кудрявцев. – Курск, 2016. – 130 с.
14. Агеев, Е. Повышение качества диагностики двигателей автомобилей / Е. Агеев, А. Кудрявцев, А. Севостьянов // *Мир транспорта и технологических машин*. – 2011. – № 3. С. 24–27.
15. Informativeness increasing of internal combustion engines diagnosis due to technical endoscope / E. Ageev, A. Altukhov, A. Scherbakov, A. Novikov // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2017. – V. 12 (4). – P. 1028–1030.
16. Агеев, Е. Алгоритм диагностирования цилиндропоршневой группы с применением технического эндоскопа / Е. Агеев, А. Кудрявцев, А. Севостьянов // *Мир транспорта и технологических машин*. – 2012. – № 1. – С. 116–122.
17. Денисов, А. Обоснование комплексной оценки технического состояния ДВС / А. Денисов, Ю. Данилов // *Грузовик*. – 2016. – № 7. С. 30–31.
18. Wolczyński, Z. Fault simulation of the sensors in gasoline engine control system / Z. Wolczyński, I. Komorska, A. Borczuch // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – V. 421(2). DOI:10.1088/1757-899X/421/2/022042
19. Komorska, I. Fault diagnostics in air intake system of combustion engine using virtual sensors / I. Komorska, Z. Woczyski, A. Borczuch // *Diagnostyka*. – 2018. – V. 19(1). – P. 25–32. DOI:10.29354/diag/80972
20. Eriksson, L. Ionization current interpretation for ignition control in internal combustion engines / L. Eriksson, L. Nielsen // *Control Engineering Practice*. – 1997. – V. 5. – Iss. 8. – P. 1107–1113.
21. Modeling and identification of an electromechanical internal combustion engine throttle body / R. Scattolini, C. Siviero, M. Mazzucco et al. // *Control Engineering Practice*. – 1997. – V. 5. – Iss. 9. – P. 1253–1259.

22. Franchek, M.A. Intake air path diagnostics for internal combustion engines / M.A. Franchek, P.J. Buehler, I. Makki // *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*. – 2007. – V. 129(1). – P. 32–40. DOI:10.1115/1.2397150
23. Kalman filter as a virtual sensor: Applied to automotive stability systems / T.A. Wenzel, K.J. Burnham, M.V. Blundell, R.A. Williams // *Transactions of the Institute of Measurement & Control*. – 2007. – V. 29(2). – P. 95–115. DOI:10.1177/0142331207072990
24. The possibilities for measurement and characterization of diesel engine fine particles – A review / V.S. Petrović, S.P. Janković, M.V. Tomić et al. // *Thermal Science*. – 2011. – V. 15(4). – P. 915–938. DOI:10.2298/TSCI110509092P
25. The design of a full flow dilution tunnel with a critical flow venturi for the measurement of diesel engine particulate emission / V. Petrović, Z. Bracanović, B. Grozdanić et al. // *FME Transactions*. – 2015. – V. 43(2). – P. 99–106. DOI:10.5937/fmet1502099P
26. Вертей, М.Л. Обоснование способа разгона двигателя с принудительным впрыском топлива и электрическим управлением топливopодачей при проведении тестового диагностирования / М.Л. Вертей // *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. – 2015. – № 2 (124). – С. 112–116.
27. Жегалин, О.И. Каталитические нейтрализаторы транспортных двигателей / О.И. Жегалин, Н.А. Курросский, В.И. Панчишный. – М.: Машиностроение, 1979. – 80 с.
28. Gritsenko, A. Experimental Studies of Cylinder Group State During Motoring / A. Gritsenko, A. Plaksin, K. Glemba // *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE)*. – 2016. – Vol. 150. – P. 1188–1191. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.234

Гриценко Александр Владимирович, доктор технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, alexgrits13@mail.ru.

Салимоненко Григорий Николаевич, аспирант кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, salimonenkog@mail.ru.

Шепелев Владимир Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, shepelevvd@susu.ru.

Шепелева Елена Витальевна, аспирант кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, sev_08@mail.ru.

Алферова Ирина Дмитриевна, аспирант кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, alferovaid@susu.ru.

Поступила в редакцию 23 марта 2020 г.

DOI: 10.14529/engin200201

ECOLOGICAL CONTROL AND TEST DYNAMIC CONTROL OF ENGINE OUTPUT PARAMETERS

A. V. Gritsenko, alexgrits13@mail.ru,

G.N. Salimonenko, salimonenkog@mail.ru,

V.D. Shepelev, shepelevvd@susu.ru,

E.V. Shepeleva, sev_08@mail.ru,

I.D. Alferova, alferovaid@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

In modern transport, environmental control plays a key role in shaping the strategy for managing the technical condition of nodes and systems. The first step in reducing the toxicity of exhaust gas emissions was the introduction of EURO standards, successively from EURO-0 to

EURO-6. Accompanying the appearance of EURO standards, catalytic converters appeared in exhaust systems, which deactivated most of the harmful emissions. Oxygen sensors also began to play a key role, with the installation of which feedback appeared. Thus, the global automotive industry is closer to the ability to control the output parameters of the engine. However, there are not enough parameters, operating modes, and additional controls available for this purpose. In the presented studies, a new method of selective control of exhaust gases in each individual cylinder was used. The basis for the application of the method was an instrument for providing test diagnostic modes, called – DBD-4 gasoline engine loader. An experimental setup has been prepared with refinement of the exhaust system. Points in the exhaust manifold were provided for individual sampling of exhaust gases with cooling of the gas analyzer probe. The following parameters were used for monitoring: the speed of rotation of the crankshaft, complete and partial (cycle-by-cycle) disconnection of cylinders, O₂, CO, CO₂, CH. The mode was provided by the number of disconnected engine operating cycles and the speed of the crankshaft. The control was performed by internal correction of the fuel supply when the duration of the injection was affected by the electromagnetic nozzle. During the research, the minimum values of the parameters of exhaust gas toxicity were established during the test effects. This method with a combination of modes and parameters reduces the toxicity of exhaust gases and improves the economy and efficiency of vehicles.

Keywords: ecology, efficiency, internal combustion engine, diagnostics.

References

1. Magaril E.R., Magaril R.Z., Bamburov V.G. Specific Features of Combustion in Gasoline-Driven Internal Combustion Engines. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2014, vol. 50(1), pp. 75–79.
2. Czech P., Bąkowski H. Diagnosing of Car Engine Fuel Injectors Damage Using DWT Analysis and PNN Neural Networks. *Transport Problems*, 2013, V. 8, iss. 3, pp. 85–91.
3. Matskerle, Yu. *Sovremennyy ekonomichnyy avtomobil* [Modern economical car]. Moscow, Mashinostroenie, 1987, 320 p.
4. Davletova N.Kh. [Motor Transport as a Global Source of Air Pollution]. *Modern high technologies*, 2005, no. 4, pp. 90–98 (in Russ.)
5. Hambartsumyan V.V., Nosov V.B., Tagasov V.I. *Ekologicheskaya bezopasnost' avtomobil'nogo transporta* [Ecological Safety of Automobile Transport]. Moscow, Publishing house “Nauchtekhlitizdat”, 1999, 324 p.
6. Nyberg M. Model-Based Diagnosis of an Automotive Engine Using Several Types of Fault Models. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, no. 10(5), pp. 679–689. DOI:10.1109/TCST.2002.801873
7. Gritsenko A.V., Glemba K.V., Larin O.N., Shefer L.A., Salimonenko G.N., Karpenko A.G., Rudnev V.V. [The Study of the Environmental Parameters of Gasoline ICE While Simulating Various Loading Modes] *Transport of the Urals*, 2018, no. 3 (58), pp. 58–63 (in Russ)
8. Chelnokov A.A., Yushchenko L. F. *Osnovy promyshlennoy ekologii* [Fundamentals of Industrial Ecology]. Minsk, Vysh. school, 2001, 343 p.
9. Hsu P., Lin K., Shen L. Diagnosis of Multiple Sensor and Actuator Failures in Automotive Engines. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1995, no. 44(4), pp. 779–789. DOI:10.1109/25.467962
10. Gritsenko A.V., Zadorozhnaya E.A., Shepelev V.D. Diagnostics of Friction Bearings by Oil Pressure Parameters During Cycle-By-Cycle Loading. *Tribology in Industry*, 2018, vol. 40. Iss. 2, pp. 300–310.
11. Savchenko O.F., Alt V.V., Olshevsky S.N., Dobrolyubov I.P. [Development of Technical Means for Diagnosing Tractor Internal Combustion Engines According to the Parameters of Work Processes]. *Proceedings of GOSNITI*, 2015, vol. 118, pp. 106–112. (in Russ)
12. Shumilin A.D., Lyandenbursky V.V., Kapunova M.K., Ivakhin V.V., Moiseev I.S. [Expert System for Monitoring the Technical Condition of Automobiles]. *Scientific Review*, 2016, no. 4, pp. 85–89. (in Russ)
13. Ageev E, Scherbakov A., Ageev A., Kudryavtsev, A. *Tekhnicheskaya endoskopiya dvigateley avtomobiley* [Technical Endoscopy of Car Engines]. Kursk, 2016. 130 p.

Расчет и конструирование

14. Ageev E., Kudryavtsev A., Sevostyanov A. [Improving the Quality of Diagnostics of Car Engines]. *The World of Transport and Technological Machines*, 2011, no. 3, pp. 24–27.
15. Ageev E., Altukhov A., Scherbakov A., Novikov A. Informativeness Increasing of Internal Combustion Engines Diagnosis due to Technical Endoscope. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, no. 12 (4), pp.1028–1030.
16. Ageev E., Kudryavtsev A., Sevostyanov A. [An Algorithm for Diagnosing a Cylinder-Piston Group Using a Technical Endoscope]. *Transport and Technological Cars*, 2012, no.1, pp.116–122 (in Russ)
17. Denisov A., Danilov Yu. [Justification of a Comprehensive Assessment of the Technical Condition of ICE]. *Gruzovik*, 2016, no. 7, pp. 30–31. (in Russ)
18. Wołczyński Z., Komorska I., Borczuch A. Fault Simulation of the Sensors in Gasoline Engine Control System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, no. 421(2) DOI:10.1088/1757-899X/421/2/022042
19. Komorska I., Woczyski, Z., Borczuch, A. Fault Diagnostics in Air Intake System of Combustion Engine Using Virtual Sensors. *Diagnostyka*, 2018, no.19(1), pp. 25–32. DOI:10.29354/diag/80972
20. Eriksson L., Nielsen L. Ionization Current Interpretation for Ignition Control in Internal Combustion Engines. *Control Engineering Practice*, 1997, vol. 5, no. 8, pp. 1107–1113.
21. Scattolini R., Siviero C., Mazzucco M., Ricci S., Poggio L., Rossi C. Modeling and Identification of an Electromechanical Internal Combustion Engine Throttle Body. *Control Engineering Practice*, 1997, vol. 5, no. 9, pp 1253–1259.
22. Franchek M.A., Buehler P.J., Makki I. Intake Air Path Diagnostics for Internal Combustion Engines. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 2007, no. 129(1), pp. 32–40. DOI:10.1115/1.2397150
23. Wenzel T.A., Burnham K.J., Blundell M.V., Williams R.A. Kalman Filter as a Virtual Sensor: Applied to Automotive Stability Systems. *Transactions of the Institute of Measurement & Control*, 2007, no. 29(2), pp. 95–115. DOI:10.1177/0142331207072990
24. Petrović V.S., Janković S.P., Tomić M.V., Jovanović Z.S., Knežević D.M. The Possibilities for Measurement and Characterization of Diesel Engine Fine Particles - A review. *Thermal Science*, 2011, no. 15(4), pp. 915–938. DOI:10.2298/TSCII10509092P
25. Petrović V., Bracanović Z., Grozdanić B., Petrović S., Sazhin S., Knežević D. The Design of a Full Flow Dilution Tunnel with a Critical Flow Venturi for the Measurement of Diesel Engine Particulate Emission. *FME Transactions*, 2015, no. 43(2), pp. 99–106. DOI:10.5937/fmet1502099P
26. Verthey M.L. [Justification of the Method of Acceleration of the Engine with Forced Fuel Injection and Electric Fuel Supply Control During the Test Diagnosis]. *Bulletin of Altai State Agrarian University*, 2015, no 2 (124), pp. 112–116. (in Russ)
27. Zhegalín O.I., Kitrossky N.A., Panchishny V.I. *Kataliticheskiye neytralizatory transportnykh dvigateley* [Catalytic Converters of Transport Engines]. Moscow, Mechanical Engineering, 1979, 80 p.
28. Plaksin A., Gritsenko A., Glemba K. Experimental Studies of Cylinder Group State During Motoring. *2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE)*, 2016, pp. 1188–1191.

Received 23 March 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Гриценко, А.В. Экологический контроль и тестовое динамическое управление выходными параметрами двигателя / А.В. Гриценко, Г.Н. Салимоненко, В.Д. Шепелев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 5–18. DOI: 10.14529/engin200201

FOR CITATION

Gritsenko A.V., Salimonenko G.N., Shepelev V.D., Shepeleva E.V., Alferova I.D. Ecological Control and Test Dynamic Control of Engine Output Parameters. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 5–18. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin200201
