

Контроль и испытания

Controlling and testing

Научная статья

УДК 621.43

DOI: 10.14529/engin240306

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕСТОВОГО МЕТОДА ПРИ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ НЕЙТРАЛИЗАТОРОВ

А.В. Гриценко^{1,2}, alexgrits13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7652-7912>

В.Д. Шепелев¹, shepelevvd@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1143-2031>

А.Ю. Бурцев³, burzeval2009@yandex.ru

А.А. Шайкемелов¹, adil_shaikemelov@mail.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия

³ Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Белово, Россия

Аннотация. Из-за ужесточения требований к нормам выбросов транспортных средств система выпуска насыщается дополнительными элементами для поддержания необходимого уровня выбросов – системой рециркуляции отработавших газов (ОГ), каталитическим нейтрализатором (КН), сажевым фильтром и т. д. Введение дополнительных элементов в систему выпуска сказывается на режимах и условиях работы двигателей внутреннего сгорания (ДВС). При этом процесс диагностирования степени износа КН осложняется из-за наличия множественных связей между структурными и диагностическими параметрами. Эти связи формируются в процессе реализации газообмена между воздухом во впускном тракте, топливно-воздушной смеси (ТВС) в цилиндре и ОГ в выпускном тракте и включают в себя целый ряд физических закономерностей, обуславливающих эти связи.

Постепенный износ каталитического нейтрализатора приводит к повышению противодавления в выпускном тракте из-за образования поверхностного нагара, оплавления и разрушения керамических сот, что повышает механические потери и снижает эффективность работы двигателя.

В статье представлен тестовый метод, позволяющий осуществлять непрерывный контроль технического состояния каталитического нейтрализатора и с высокой точностью идентифицировать его изменения.

В теоретической части исследования рассмотрена методика расчета сопротивления каталитического нейтрализатора с учетом влияния сопротивлений пористого объема, термического сопротивления и сопротивления структуры (вида) материала. В экспериментальной работе анализировались данные при взаимодействии только двух входных параметров – длительность впрыска и эквивалентное сопротивление каталитического нейтрализатора.

Ключевые слова: ДВС, диагностирование, коэффициент избытка воздуха, каталитический нейтрализатор, длительность впрыска

Для цитирования: Применение тестового метода при экологическом мониторинге каталитических нейтрализаторов / А.В. Гриценко, В.Д. Шепелев, А.Ю. Бурцев, А.А. Шайкемелов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2024. Т. 24, № 3. С. 64–74. DOI: 10.14529/engin240306

APPLICATION OF TEST METHOD IN ENVIRONMENTAL MONITORING OF CATALYTIC CONVERTERS

A.V. Gritsenko^{1,2}, alexgrits13@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7652-7912>
V.D. Shepelev¹, shepelevvd@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1143-2031>
A.Yu. Burzev³, burzeval2009@yandex.ru
A.A. Shaikemelov¹, adil_shaikemelov@mail.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia

³ T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Belovo, Russia

Abstract. Due to the tightening emissions regulations for vehicles, the exhaust system is being equipped with additional components to maintain the required emission levels, such as an exhaust gas recirculation (EGR) system, catalytic converter (CC), diesel particulate filter (DPF), and so on. The introduction of these additional elements in the exhaust system affects the operating conditions and modes of internal combustion engines (ICE). However, the process of diagnosing the CC wear level is complicated due to multiple interdependencies between structural and diagnostic parameters. These interdependencies are formed during the gas exchange process between the intake air, fuel-air mixture in the cylinder, and exhaust gas, and involve a range of physical relationships that determine these interdependencies.

Gradual wear of the catalytic converter leads to increased backpressure in the exhaust system due to the formation of surface deposits, melting and destruction of ceramic cells, which increases mechanical losses and reduces engine efficiency.

This article presents a test method that enables continuous monitoring of the technical condition of the catalytic converter and accurately identifies its changes.

The theoretical part of the study discusses the methodology for calculating the resistance of the catalytic converter, taking into account the influence of resistances in the porous volume, thermal resistance, and material structure resistance. The experimental work analyzed the data obtained from the interaction of only two input parameters: injection duration and equivalent resistance of the catalytic converter.

Keywords: internal combustion engine (ICE), diagnostics, air-fuel ratio, catalytic converter, injection duration

For citation: Gritsenko A.V., Shepelev V.D., Burtsev A.Yu., Shaikemelov A.A. Application of test method in environmental monitoring of catalytic converters. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2024:24(3):64–74. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin240306

Введение

В настоящее время разработчики автотракторных средств придерживаются принципов минимизации абсолютного и относительного количества отработавших газов [1–3]. Главным вопросом эксплуатации автотракторной техники является обеспечение минимального расхода топлива при предельно малых выбросах отработавших газов [4–6]. Однако множественные факторы, влияющие на правильность выполнения функций ДВС, приводят к изменению выходных показателей процессов. Одним из таких показателей выступает коэффициент избытка воздуха [7, 8]. Данный параметр корректируется электронным блоком управления и поддерживается в заданных пределах для обеспечения эффективной и экономичной работы автотракторных средств [9, 10]. В случае изменения технического состояния систем ДВС в первую очередь электронный блок управления воздействует на данный параметр [11, 12]. Коэффициент избытка воздуха может значительно изменяться от своей номинальной величины, что может послужить диагностическим признаком появления неисправностей отдельных элементов и систем ДВС [13, 14]. В частности, каталитический нейтрализатор является наиболее уязвимым элементом среди всех систем ДВС [15–17]. Также от его правильной работы зависит количество токсичных компонентов, выбрасываемых в атмосферу.

ваемых в систему выпуска. Кроме того, важно производить контроль длительности впрыска и рабочее положение дроссельной заслонки для адекватной оценки изменений работы ДВС. Параметры СО и СН традиционно считаются одними из самых токсичных компонентов выпуска современных ДВС [18, 19]. Любое изменение процесса выпуска, впуска, сгорания сопровождается значительным изменением этих параметров. В частности, изменение сопротивления на выпуске приводит к изменению параметров СО и СН [20].

Однако неизвестно, с какой скоростью изменяются параметры токсичности, что и требуется определить в результате экспериментальной работы. На первый план выходят новые контролируемые параметры, которые раньше не регламентировались. К таким параметрам можно отнести компоненты отработавших газов – СО₂ и О₂. Так, например, концентрацию СО₂ на выпуске пытаются снизить до уровня 70–100 г/км [15, 21].

Контроль СО₂ до сих пор реализован только выносными приборными средствами, хотя вопрос ставится о непрерывном контроле СО₂ и активном отслеживании данного параметра за весь срок службы автотракторного средства. Контроль параметра О₂ реализован в современном автотракторостроении за счет установки в систему выпуска λ-зонда с широкополосным диапазоном. Принцип контроля параметра О₂ выполнен на постоянной основе. Любые изменения технического состояния узлов и систем ДВС сказываются на величине концентрации О₂ на выпуске. С учетом сказанного целью статьи является повышение эффективности диагностирования каталитического нейтрализатора путем контроля параметров токсичности отработавших газов.

Материалы и методы

В теории расчета КН используется множество подходов, зависящих от конкретных условий эксплуатации автотракторного средства. В технических расчетах удобнее пользоваться характеристикой изменения технического состояния КН – пневматическим сопротивлением. Пневматическое сопротивление КН можно определяется:

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_{\text{пор}} + \Delta P_{\text{тепл}} + \Delta P_{\text{стр}}, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{общ}}$ – суммарное обобщенное пневматическое сопротивление, Па; $\Delta P_{\text{пор}}$ – сопротивление пористой структуры КН, Па; $\Delta P_{\text{тепл}}$ – сопротивление, возникающее в результате термического действия в КН, Па; $\Delta P_{\text{стр}}$ – сопротивление, возникающее в результате противодействия структуры используемого материала в КН, Па.

Сопротивление пористой структуры КН можно определить из формулы Хаген–Пуазейля:

$$\Delta P_{\text{пор}} = K_n \frac{\mu \cdot L \cdot v}{F \cdot \Delta \Phi}, \quad (2)$$

где K_n – коэффициент пористости КН, %; μ – вязкость ОГ, поступающих в выпускной тракт, Па·с; L – длина активной части КН, м; v – скорость потока ОГ на КН, м/с; F – площадь поперечного сечения КН, м²; $\Delta \Phi$ – пористость, %.

Сопротивление, возникающее в результате термического действия в КН, определяется:

$$\Delta P_{\text{тепл}} = \frac{R_{\text{тепл}}}{F} (T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}), \quad (3)$$

где $R_{\text{тепл}}$ – термическое сопротивление активных сот КН (коэффициент термического расширения), Па·м²/°С; $T_{\text{вх}}$ – температура на входе в КН, °С; $T_{\text{вых}}$ – температура на выходе из КН, °С.

Сопротивление, возникающее в результате противодействия структуры используемого материала в КН, определяется:

$$\Delta P_{\text{стр}} = R_{\text{стр}} \frac{2\rho \cdot L \cdot v^2}{D \cdot \Delta \Phi^2}, \quad (4)$$

где $R_{\text{стр}}$ – коэффициент, учитывающий сопротивление материала структуры КН; ρ – плотность ОГ, поступающих в выпускной тракт, кг/м³; D – диаметр активной части КН, м.

Для реализации экспериментальной части исследования были поставлены задачи: спроектировать экспериментальный стенд, выбрать диагностическое оборудование, разработать методики проведения экспериментов, выбрать программный продукт для обработки экспериментальных данных.

Экспериментальный стенд (рис. 1) представляет собой двигатель, оснащенный всеми необходимыми системами для его функционирования: система питания с топливным баком, панель управления, система выпуска с вытяжкой для отвода ОГ, рама.

Для проведения контроля параметров токсичности использовался газоанализатор Инфракар М1-01, заборный зонд которого присоединялся к точкам контроля в выпускном коллекторе (рис. 2).



**Рис. 1. Экспериментальный стенд
Fig. 1. Experimental stand**



**Рис. 2. Заборный зонд газоанализатора Инфракар М1-01, присоединенный к точкам контроля в выпускном коллекторе
Fig. 2. Intake probe of the Infracar M1-01 gas analyzer, connected to the control points in the exhaust manifold**

Заборный зонд при помощи резьбового соединения присоединен к выпускному коллектору. Для охлаждения ОГ был использован промежуточный охлаждающий змеевик с учетом того, чтобы температура в месте контроля не превышала допустимой величины.

В качестве нагрузочного средства был выбран прибор ДБД-4 для тестового диагностирования (рис. 3).



**Рис. 3. Прибор ДБД-4 для тестового диагностирования
Fig. 3. DBD-4 device for test diagnostics**

Основой приборного диагностирования выступает тестовый метод, реализуемый прибором ДБД-4 [22]. Сочетание тестового контроля и газоанализа позволяет вывести диагностируемую систему в такое состояние, при котором степень проявления неисправности максимально коррелирует с созданным режимом и выходными параметрами состояния.

При проведении эксперимента была выбрана матрица на основе схемы 33 и реализованы все 27 возможных сочетаний. Полученные данные подвергались обработке стандартными методиками регрессионного анализа в программном продукте – SigmaPlot 14.5. По полученным точечным данным строились трехмерные полигоны связей входных и выходных параметров, после чего подбирались уравнения регрессии из числа стандартных функций.

Результаты и обсуждения

В основной части исследований был проведен пробный эксперимент. Выходным показателем контроля выступал коэффициент избытка воздуха α . При проведении эксперимента варьируемыми входными величинами являлись сечение каталитического нейтрализатора R (мм) и длительность впрыска t (мс).

Были обработаны данные 60 единичных опытов многофакторного пробного эксперимента. Пробный эксперимент проводился с учетом максимального разброса уровня варьирования входных параметров. По ходу его проведения изучалась возможность коррекции отдельных параметров эксперимента, достижения максимума или минимума варьируемых величин, оценки достоверности и точности контролируемых параметров. В результате реализации матрицы эксперимента в приложении Sigma Plot в режиме автоматической обработки данных получена табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных данных по искомому параметру α при варьировании входных факторов
Table 1

The results of experimental data on the desired parameter α with varying input factors

Коэффициент	Значение коэффициента	Стандартная ошибка оценивания	t	P	
R	0,9379	0,0849			
R^2	0,8796				
$Adj R^2$	0,8708				
y_0	3,1685	0,2445	12,9605	<0,0001	
a	-0,0082	0,0101	-0,8150	0,4186	
b	-0,2824	0,0377	-7,4851	<0,0001	
c	0,0001	0,0003	0,4354	0,6650	
d	0,0086	0,0016	5,5267	<0,0001	
Дисперсионный анализ					
	DF	SS	MS		
Регрессия	5	65,2883	13,0577		
Остаточный	55	0,3967	0,0072		
Общий	60	65,6850	1,0948		
Скорректированное на среднее значение наблюдений					
	DF	SS	MS	F	P
Регрессия	4	2,8970	0,7242	0,9531	0,0218
Остаточный	55	0,3967	0,0072		
Общий	59	3,2937	0,0558		

Обработка данных и их многомерная интерпретация представлена на рис. 4.

Взаимосвязь искомой величины выходного параметра α (см. рис. 4) с высокой достоверностью $R^2 = 0,879\%$ определяется:

$$\alpha = 3,168 - 0,008 \cdot R - 0,282 \cdot t + 0,0001 \cdot R^2 + 0,0086 \cdot t^2. \quad (5)$$

Как видно из рис. 4, зависимость представлена множественными точками с единичными пиками экстремумов. Эти экстремумы имеют местное значение и на базовую форму поверхности отклика сильно не влияют. При малых длительностях впрыска ($t = 8$ мс) обнаруживается максимальное значение параметра $\alpha = 1,58$, т. е. при смешивании воздуха с топливом образуется бедная топливно-воздушная смесь. По мере увеличения длительности впрыска до 17 мс наблюдается плавный тренд снижения коэффициента избытка воздуха α , объясняется это обогащением топливно-воздушной смеси. Степень снижения α достигает значений 0,6...0,7.

В результате предварительного эксперимента были получены экспериментальные зависимости параметров CO (%) и CH (млн⁻¹) от размера эквивалентного сечения каталитического нейтрализатора R и длительности впрыска t . Все занесенные в матрицу эксперимента и обработанные с

помощью приложения Sigma Plot данные были отображены в виде поверхностей отклика второго порядка (рис. 5 и 6).

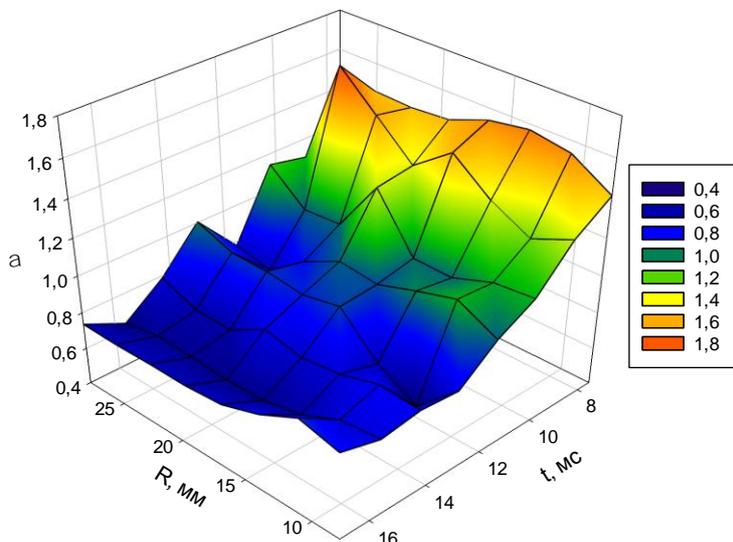


Рис. 4. Зависимость параметра α от размера эквивалентного сечения каталитического нейтрализатора и длительности впрыска
Fig. 4. Dependence of the parameter α on the size of the equivalent section of the catalytic converter and the duration of injection

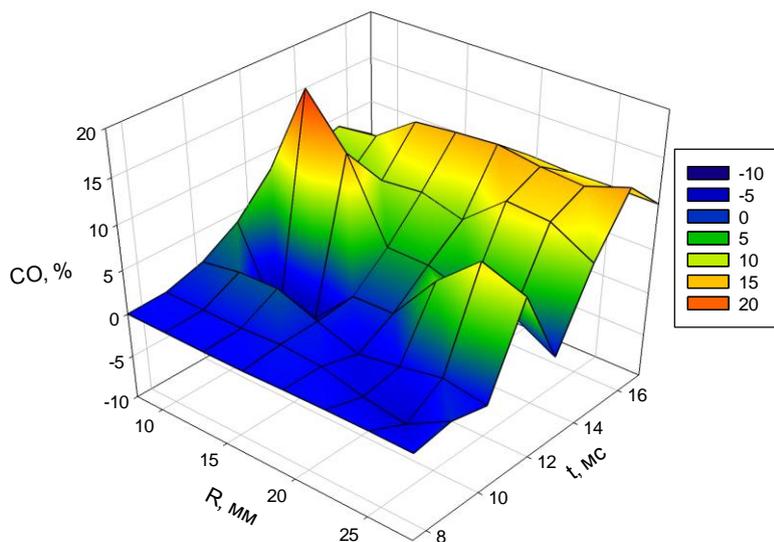


Рис. 5. Зависимость CO от размера эквивалентного сечения каталитического нейтрализатора и длительности впрыска
Fig. 5. The dependence of CO on the size of the equivalent section of the catalytic converter and the duration of injection

График на рис. 5 описывается полиномом второго порядка с точностью подбора уравнения $R^2 = 0,81$ %:

$$CO = -5,0884 - 0,0511 \cdot R + 0,2389 \cdot t + 0,0016 \cdot R^2 + 0,0465 \cdot t^2. \quad (6)$$

Зависимость (6) при минимальных длительностях впрыска $t = 8$ мс дает незначительное содержание концентрации CO в отработавших газах. Минимум содержания CO говорит о лучших условиях процесса сгорания ТВС. Далее по мере увеличения длительности впрыска содержание CO начинает повышаться, достигая в ряде промежуточных точек максимумов. При максимальной длительности впрыска среднее содержание CO в отработавших газах составляет более 10 %. Высокое содержание параметра CO говорит об избыточном переобогащении ТВС и худших ус-

ловиях процесса сгорания. Из рис. 5 следует, что повышение сопротивления каталитического нейтрализатора не приводит к заметному изменению содержания CO в ОГ. Уменьшение сечения выпускного тракта еще не говорит о том, что каталитический нейтрализатор стал хуже работать или ТВС стала хуже гореть. Изменяющееся сопротивление каталитического нейтрализатора не влияет на его термические и химические свойства. Он сохраняет свою работоспособность по преобразованию токсичных компонентов отработавших газов. Но при этом ограничение сечения на выпуске тормозит поток вытесняемых газов, не изменяя их химический состав. Если сечение каталитического нейтрализатора будет уменьшаться ниже значений, установленных в эксперименте, то будет происходить нарушение баланса впуска и выпуска ОГ на возросшем сопротивлении и степень связи может существенно усилиться.

Графическая зависимость параметра СН (млн⁻¹) от размера эквивалентного сечения каталитического нейтрализатора R и длительности впрыска t представлена на рис. 6 и описывается полиномом с точностью $R^2 = 0,53 \%$:

$$\text{CH} = 27,2758 - 4,4627 \cdot R - 3,6924 \cdot t + 0,1153 \cdot R^2 + 0,8336 \cdot t^2. \quad (7)$$

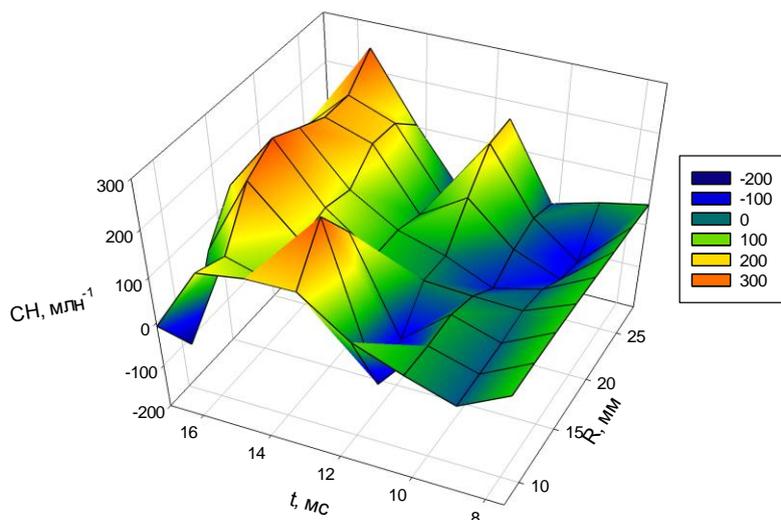


Рис. 6. Зависимость СН от размера эквивалентного сечения каталитического нейтрализатора и длительности впрыска
Fig. 6. The dependence of CH on the size of the equivalent section of the catalytic converter and the duration of injection

Как видно из рис. 6, зависимость параметра СН от величины t имеет ломаный характер. Явные пики максимумов обнаруживаются при значениях $t = 12$ мс, $t = 14$ мс и $t = 16$ мс. Общий тренд зависимости СН от величины t имеет восходящий характер, т. е. с увеличением t возрастает величина СН. Анализ взаимосвязи параметра СН от величины эквивалентного сечения каталитического нейтрализатора R показывает на ряд характерных областей с пиковыми значениями СН и минимумами.

Разложение графика, приведенного на рис. 6, на отдельные сектора даст более достоверные результаты и обнаружит явные связи. В области максимальных t с ростом пневматического сопротивления тренд зависимости СН резко понижается, так же как и при $t = 12$ мс. В зоне малых длительностей впрыска явной взаимосвязи СН со значениями R не обнаруживается.

Следует вывод, что параметр СН пригоден для контроля технического состояния каталитического нейтрализатора. Высокая степень связи СН с сопротивлением каталитического катализатора обнаруживается при больших длительностях впрыска и предельных значениях пневматического сопротивления. Однако низкое значение достоверности аппроксимации ($R^2 = 0,53 \%$) говорит о слабой связи входных факторов с выходными.

На следующем этапе контролировался параметр CO₂ при вариации входных факторов. В результате была построена поверхность отклика (рис. 7), которая описывается полиномом ($R^2 = 0,54 \%$):

$$\text{CO}_2 = -3,3607 + 0,1979 \cdot R + 2,6103 \cdot t - 0,0049 \cdot R^2 - 0,1251 \cdot t^2. \quad (8)$$

Зависимость параметра CO_2 при малых длительностях впрыска находится в синей зоне в пределах $\text{CO}_2 = (10 \pm 1) \%$ (см. рис. 7). По мере увеличения длительности впрыска наблюдается заметный рост CO_2 , обнаруживая максимальное значение при $t = 12$ мс. Последующий рост длительности впрыска вызывает заметное уменьшение параметра CO_2 до уровня $\text{CO}_2 = (9 \pm 4) \%$. Анализ изменения эквивалентного сечения каталитического нейтрализатора R показывает, что рост пневматического сопротивления вызывает значительное увеличения показателя CO_2 при $R = 8 \dots 10$ мм.

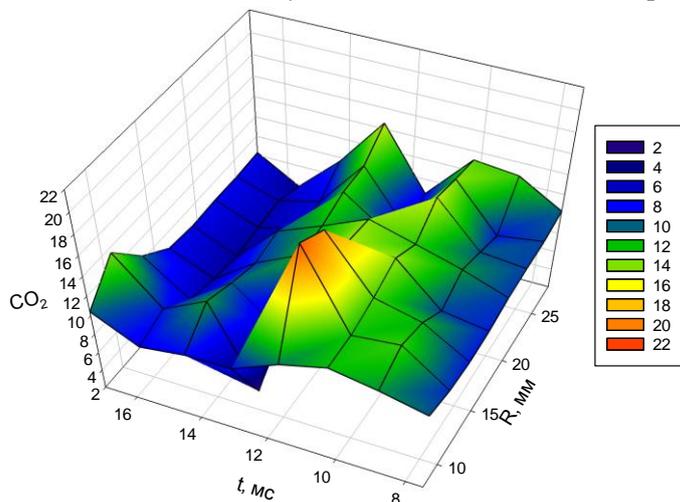


Рис. 7. Зависимость CO_2 от размера эквивалентного сечения каталитического нейтрализатора и длительности впрыска
Fig. 7. The dependence of CO_2 on the size of the equivalent section of the catalytic converter and the duration of injection

Максимум значения CO_2 достигает 20...22 % (см. рис. 7). Следует вывод, что параметр CO_2 пригоден для контроля технического состояния каталитического нейтрализатора.

На втором этапе контролировался параметр O_2 (%), графическая интерпретация поверхности отклика которого приведена на рис. 8.

Поверхность отклика на рис. 8 описывается при точности подбора уравнения $R^2 = 0,78 \%$:

$$\text{O}_2 = 29,0868 - 0,205 \cdot R - 3,7508 \cdot t + 0,0037 \cdot R^2 + 0,1316 \cdot t^2. \quad (9)$$

Из рис. 8 видна зависимость параметра O_2 от параметра t . Прослеживается нелинейная взаимосвязь в виде возрастающей кривой второго порядка. Причем в зоне малых длительностей впрыска от 8 до 12 мс наблюдается резкое снижение O_2 с величины 8,2 до 0,2 %.

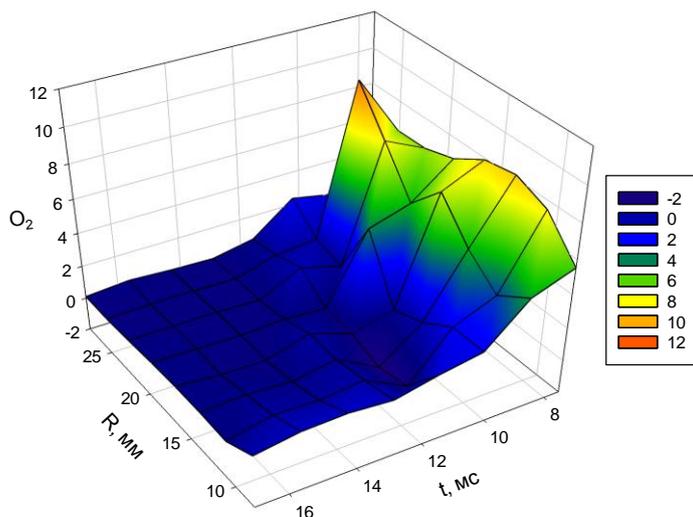


Рис. 8. Зависимость O_2 от размера эквивалентного сечения каталитического нейтрализатора и длительности впрыска
Fig. 8. The dependence of O_2 on the size of the equivalent section of the catalytic converter and the duration of injection

В зоне больших длительностей впрыска от 12 до 17 мс наблюдается пологая характеристика без явных изменений на уровне 0,1 % (см. рис. 8). Объяснить это можно наличием большого объема свободного кислорода при бедной смеси и его существенным уменьшением при росте степени обогащения ТВС.

Выводы

В результате проведенных исследований были получены поверхность отклика и уравнение регрессии, при использовании которых можно определять техническое состояние каталитического нейтрализатора. Расчет корреляции показал, что взаимосвязи параметра R с коэффициентом избытка воздуха α фактически не наблюдается (проверка корреляции по методу Пирсона). Корреляция входного параметра t с выходным показателем α высокая и составляет $-0,898$. Знак минус показывает на корреляционную обратную связь, т. е. при возрастании параметра t параметр α уменьшается. Разработанная методика может применяться в практике диагностирования ДВС и, в частности, для контроля каталитических нейтрализаторов.

В будущих исследованиях необходимо проверить предельно возможное увеличение сопротивления на выпуске для установления связи концентрации параметров ОГ с динамикой изменения сопротивления каталитического нейтрализатора. Корреляция параметра R с параметром СО фактически не наблюдается (проверка корреляции по методу Пирсона показала результат 0,03). Корреляция входного параметра t с выходным показателем СО высокая и составляет 0,897.

Для увеличения корреляции параметров необходимо разбить зависимость на рис. 6 на меньшие сектора и рассмотреть их независимо. Корреляция параметра R с параметром СН фактически не наблюдается (проверка корреляции по методу Пирсона показала результат 0,01). Она в неявном виде прослеживается в зоне больших значений $t = 16 \dots 17$ мс и $R = 8 \dots 15$ мм. Корреляция входного параметра t с выходным показателем СН (млн^{-1}) находится на среднем уровне и составляет 0,721.

Высокая степень связи CO_2 с сопротивлением каталитического катализатора обнаруживается при малых длительностях впрыска и предельных значениях пневматического сопротивления. Однако низкое значение достоверности аппроксимации ($R^2 = 0,54$ %) говорит о слабой связи входных факторов с выходными. Для увеличения корреляции параметров необходимо разбить зависимость на рис. 7 на меньшие сектора и рассмотреть их независимо. Корреляция параметра R с параметром CO_2 фактически не наблюдается (проверка корреляции по методу Пирсона показала результат 0,01). Она в неявном виде прослеживается в зоне малых значений $t = 8 \dots 12$ мс и $R = 8 \dots 15$ мм. Корреляция входного параметра t с выходным показателем CO_2 (%) ниже среднего и составляет $(-0,583)$.

Следует вывод, что параметр O_2 совсем не обнаруживает связи с входным параметром R . При этом коэффициент корреляции составляет $-0,01$. В тот же момент весовую тесноту связи обнаруживают параметры O_2 с длительностью впрыска t . Коэффициент корреляции этой взаимосвязи составил $-0,74$.

Список литературы / References

1. Deutschmann O., Grunwaldt J. *Exhaust Gas Aftertreatment in Mobile Systems: Status, Challenges, and Perspectives*. *Chemie Ingenieur Technik*, 2013, 85(5): 595–617. DOI: 10.1002/cite.201200188
2. Twigg M.V. *Catalytic control of emissions from cars*. *Catalysis Today*, 2011; 163(1): 33–41. DOI: 10.1016/j.cattod.2010.12.044.
3. Исаенко В.Д., Исаенко А.В., Исаенко П.В. Очистка выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания СВС-элементами // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2021. № 2. С. 21–29. [Isaenko V.D., Isaenko A.V., Isaenko P.V. Purification of exhaust gases from internal combustion engines with SHS-elements. *Transport. Transport Facilities. Ecology*, 2021; 2: 21–29. (In Russ.)] DOI: 10.15593/24111678/2021.02.03.
4. Guan W., Zhao H., Ban Z., Lin T. Exploring alternative combustion control strategies for low-load exhaust gas temperature management of a heavy-duty diesel engine. *International Journal of Engine Research*, 2019; 20(4): 381–392. DOI: 10.1177/1468087418755586.
5. Sellnau M., Moore W., Sinnamon J., Hoyer K., Foster M., Husted H. GDCI Multi-Cylinder Engine for High Fuel Efficiency and Low Emissions. *SAE International Journal of Engines*, 2015; 8(2): 775–790. DOI: 10.4271/2015-01-0834.

6. Van Dooren S., Duhr P., Amstutz A., Onder C.H. Optimal control of real driving emissions. *Control Engineering Practice*, 2022; 127:105269. DOI: 10.1016/j.conengprac.2022.105269.
7. Ma F., Jiang L., Naeve N., He Y. The effect of excess air ratio on performance of internal combustion engine at idle conditions for different H₂/CNG ratios. *EVS – Sustainable Mobil. Revolut.: World Battery, Hybrid Fuel Cell Electr. Veh. Symp. Exhib. Electric Drive Transportation Association*, 2010.
8. Kharazmi S., Hajilouy Benisi A., Mozafari A. An Experimental and Theoretical Study of the Effects of Excess Air Ratio and Waste Gate Opening Pressure Threshold on NO_x Emission and Performance in a Turbocharged CNG SI Engine. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 2014; 28: 251–260. DOI: 10.5829/idosi.ije.2015.28.02b.11.
9. Qi J.X. Research and Improvement on Calculation Method of Optimal Excess Air Ratio. *Applied Mechanics and Materials*, 2014; 536–537: 1583–1586. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.536-537.1583
10. İlhak M.İ., Tangöz S., Akansu S.O., Kahraman N. An experimental investigation of the use of gasoline-acetylene mixtures at different excess air ratios in an SI engine. *Energy*, 2019; 175: 434–444. DOI: 10.1016/j.energy.2019.03.058
11. Lee S., Kim Y., Lee J., Kim K., Lee Seungil, Min K., Oh S. Energy and exergy analyses of hydrogen-fueled spark ignition engine with various air excess ratios and ignition timings. *Fuel*, 2023; 349: 128588. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.128588
12. Gong C., Yu J., Liu F. Combined impact of excess air ratio and injection strategy on performances of a spark-ignition port- plus direct-injection dual-injection gasoline engine at half load. *Fuel*, 2023; 340: 127605. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.127605
13. Yukitake T., Sohma K., Azuhata S., Takaku Y. Application of Two-Color Optical Measurement for Detecting an Excess Air Factor in a Spark Ignition Engine. *Transactions of The Japan Society of Mechanical Engineers Series B*, 1991; 57(539): 2410–2415. DOI: 10.1299/kikaib.57.2410
14. Piernikarski D. Integrated optical system for investigation and diagnostics of abnormal combustion in an automotive engine. *Proceedings of the SPIE*, 2014; 5576: 284–289. DOI: 10.1117/12.581777
15. Lupescu J.A., Schwank J.W., Dahlberg K.A., Seo C.Y., Fisher G.B., Peczonczyk S.L., Rhodes K., Jagner M.J., Haack L.P. Pd model catalysts: Effect of aging environment and lean redispersion. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2016; 183: 343–360. DOI: 10.1016/j.apcatb.2015.10.018
16. Song J., Choi M., Lee J., Kim J.M. Improvement of Fuel Economy and Greenhouse Gases Reduction in Gasoline Powered Vehicles Through the TWC-NO_x Trap Catalyst. *International Journal of Automotive Technology*, 2020; 21(2): 441–449. DOI: 10.1007/s12239-020-0041-8
17. Datye A.K., Votsmeier M. Opportunities and challenges in the development of advanced materials for emission control catalysts. *Nature Materials*, 2021; 20(8): 1049–1059. DOI: 10.1038/s41563-020-00805-3
18. Zhang J., Lou D., Sun Y., Tan P., Hu Z., Huang C. Effects of DOC and CDPF Catalyst Composition on Emission Characteristics of Light-Duty Diesel Engine with DOC + CDPF + SCR System. *WCX World Congress Experience*, 2018; 2018-01–0337. DOI: 10.4271/2018-01-0337
19. He B.J.-J., Wang C.-X., Zheng T.-T., Zhao Y.-K. Thermally Induced Deactivation and the Corresponding Strategies for Improving Durability in Automotive Three-Way Catalysts: A review of latest developments and fundamentals. *Johnson Matthey Technology Review*, 2016; 60(3): 196–203. DOI: 10.1595/205651316X691960
20. Hickey N., Boscarato I., Kaspar J. *Air Pollution from Mobile Sources: Formation and Effects and Abatement Strategies*. Current Environmental Issues and Challenges (ed. Cao G., Orrù R.). Dordrecht: Springer Netherlands, 2014; 15–43.
21. Hegarty K., Dickinson P., Cieslar D., Collings N. Fast O₂ Measurement using Modified UEGO Sensors in the Intake and Exhaust of a Diesel. *Engine*, 2013; 2013-01–1051. DOI: 10.4271/2013-01-1051
22. Gritsenko A., Shepelev V., Zadorozhnaya E., Shubenkova. Test diagnostics of engine systems in passenger cars. *FME Transactions*, 2020; 48(2): 46–52. DOI: 10.5937/fmet2001046G

Информация об авторах

Гриценко Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет; профессор кафедры «Технический сервис машин, оборудования и безопасности жизнедеятельности», Южно-Уральский государственный аграрный университет, Челябинск, Россия; alexgrits13@mail.ru

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

Бурцев Александр Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Специальные дисциплины» филиала Кузбасского государственного технического университета им. Т.Ф. Горбачева, Белово, Россия; burzeval2009@yandex.ru

Шайкемелов Адиль Амандыкович, аспирант кафедры «Автомобильный транспорт», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; adil_shaikemelov@mail.ru

Information about the authors

Alexander V. Gritsenko, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automotive Transport, South Ural State University; Professor of the Department of Technical Service of Machinery, Equipment and Life Safety, South Ural State Agrarian University, Chelyabinsk, Russia; alexgrits13@mail.ru

Vladimir D. Shepelev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Transport, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shepelevvd@susu.ru

Alexander Yu. Burzev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of “Special Disciplines”, the branch of the Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev, Belovo, Russia; burzeval2009@yandex.ru

Adil A. Shaikemelov, Postgraduate student of the Department of Automobile Transport, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; adil_shaikemelov@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 04.06.2024; принята к публикации 19.08.2024.
The article was submitted 04.06.2024; accepted for publication 19.08.2024.*