

П. В. ЛИТВИНОВ<sup>1,2</sup>  
В. Р. ВЕДРУЧЕНКО<sup>1</sup>  
В. А. БОРИСОВ<sup>3,4</sup>  
А. В. ШТИБ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Омский государственный  
университет путей сообщения,  
г. Омск

<sup>2</sup>Омское моторостроительное  
конструкторское бюро,  
г. Омск

<sup>3</sup>Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

<sup>4</sup>Институт проблем  
переработки углеводородов СО РАН,  
г. Омск

## ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С КРИТЕРИЯМИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОРШНЕЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

Диагностическая практика показывает, что конструкция двигателя и его систем усложняется при повышении его экологической безопасности. При этом необходимые в данном случае диагностику и испытания зачастую сложно проводить на автомобильном двигателе в условиях реальной эксплуатации. Эти требования относятся к испытанию поршней, модифицированных каталитическими покрытиями. Условия их испытания, критерии диагностики и работоспособности рассмотрены в данной статье.

**Ключевые слова:** диагностика, каталитические покрытия, достоверность, ошибки, двигатель внутреннего сгорания.

**Введение.** Существующие требования к повышению экологической безопасности двигателей внутреннего сгорания (ДВС) ставят перед инженерами-конструкторами ряд задач, способствующих снижению вредных примесей в отработавших газах (ОГ). Очистка отработавших газов (ОГ) ДВС от токсичных компонентов является одной из актуальных проблем, поскольку ужесточение норм экологической безопасности происходит раз в 5–7 лет [1]. Одним из способов повышения экологической безопасности является установка поршней с каталитическими покрытиями [2, 3]. Любое покрытие поршня, в свою очередь, нуждается в испытаниях как на эффективность, так и на прочность. Также важна оценка их влияния на работоспособность двигателя. С этой целью необходимо определить возможные последствия ошибок и условия для правильной диагностики двигателя.

Также ведётся разработка каталитических нейтрализаторов [4], использование водосодержащих присадок и впрыска водорода [5], термобарьерных покрытий [6] и каталитических покрытий [7–9].

Тем не менее подробное описание каталитических покрытий в настоящее время не является структурированным, а данные разрознены, что, в свою очередь, не позволяет оценить их эффективность сравнительно простыми способами.

**История создания покрытий.** Подробное описание различных покрытий в настоящее время структурировано по большей части в зарубежных источниках [7]. В российских более распространено исследование способности каталитических покрытий к конверсии углеводородов и окиси углерода с анализом путей образования вредных веществ [10]. Различные покрытия на поршень создавались с XX века. Так, известны медные, корундовые, керамические и каталитические покрытия [6–11].

Каталитическим покрытиям зачастую предшествуют термобарьерные. Возможность создания таких покрытий впервые была описана в работе [12]. Тогда же был предложен метод плазменно-электролитического окисления (ПЭО), также именуемый микродуговым окислением (МДО). ПЭО повышало теплостойкость материала и улучшало

его прочностные характеристики. Более подробно термобарьерные покрытия и их свойства, а также экспериментальные исследования представлены в работах [6].

**Каталитические покрытия.** Данные покрытия служат для нейтрализации вредных выбросов, таких как CO, C<sub>x</sub>H<sub>x</sub>, в меньшей степени NO<sub>x</sub>, в отработавших газах поршневых двигателей. В наших предыдущих работах [2, 3] уже описывались преимущества каталитических покрытий перед каталитическими нейтрализаторами, в частности, то, что они начинают действовать в момент пуска двигателя, тогда как нейтрализатору необходим прогрев.

Исследования каталитических покрытий в 1995 году начали британские учёные Z. Hu и N. Laddomatos [8]. Каталитическими материалами в этой работе являлись медь и платиново-родиевая смесь. Эксперимент был осуществлён на поршне бензинового двигателя Ricardo E6 с переменной степенью сжатия и дискообразной камерой сгорания. При проведении эксперимента исследователи добились существенного снижения эмиссии углеводородов, и незначительного — оксидов азота при использовании платиново-родиевого покрытия. Медное покрытие обладало меньшими каталитическими свойствами. Позже медное покрытие при использовании его на двухтактном двигателе при использовании этилированных и неэтилированных бензинов исследовал S. Narasima Kumar [11].

В наших работах [2, 3, 13] также были исследованы различные виды каталитических покрытий и путей образования вредных веществ в отработавших газах поршневых двигателей. Работа [3] является основной в этом направлении. В ней была рассмотрена способность к конверсии CO и CH различных каталитических покрытий, в частности, палладиевых и медно-цериевых.

**Основная часть.** Количество вредных выбросов является диагностическим параметром двигателя. Система технической диагностики является совокупностью средств, методов и объемов диагностирования совместного с исполнителями диагностических операций.

Результаты технической диагностики являются основанием для решения вопроса о дальнейшем характере и режиме использования ДВС [14].

Эффективность диагностики в данном случае оценивается различными критериями и напрямую связана с эффективностью каталитического покрытия. При этом важна точность и достоверность полученных результатов. Продолжительность диагностирования в данном случае будет зависеть от методики испытания, как и от общего числа проверок.

В работе [14] для оценки эффективности и достоверности процесса диагностирования предложена диаграмма, представленная на рис. 1.

Согласно [14], Г, Б — исходное состояние диагностируемого объекта (соответственно исправен или неисправен), Г', Б' — вывод о его состоянии после диагностического эксперимента. Согласно той же работе, возможны четыре типа решения: вероятности P(Г'/Г) и P(Б'/Б), когда соответственно исходно исправные и неисправные объекты признаются таковыми, и вероятности P(Б'/Г) и P(Г'/Б), когда соответственно исправный признаётся неисправным, а неисправный — исправным. Автор также вводит понятие ошибок I и II рода соответственно обозначенным выражениям (1) и (2):

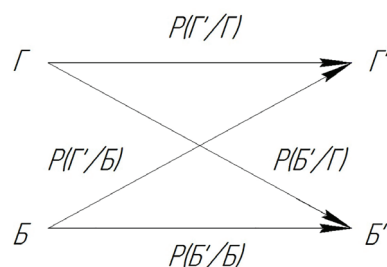


Рис. 1. Диаграмма результатов диагностического эксперимента

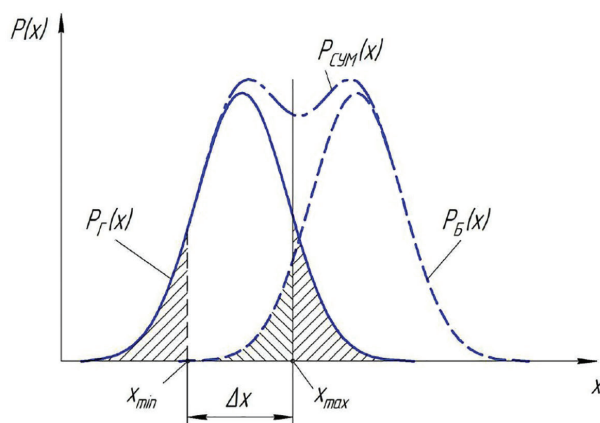


Рис. 2. Плотность распределения диагностического параметра x

$$P_I = P(\Gamma' / \Gamma), \quad (1)$$

$$P_{II} = P(\Gamma / \Gamma'). \quad (2)$$

Вводимый автором диагностический параметр  $x$  должен иметь значение  $x_n$ . Поле допуска обозначается  $\Delta x$  и соответствует выражению (3):

$$\Delta x = x_{\max} - x_{\min}. \quad (3)$$

Для оценки ошибок параметр  $x$  представляется случайной величиной, описываемой плотностями  $P_\Gamma(x)$  и  $P_\beta(x)$  для исправных и неисправных состояний соответственно (рис. 2) [14].

При исправном объекте и границах  $[x_{\min}; x_{\max}]$  вероятность правильного решения  $P(\Gamma'/\Gamma)$  определяется следующим интегралом [14]:

$$P(\Gamma' / \Gamma) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} P_\Gamma(x) dx. \quad (4)$$

Ошибка в принятии решения определяется в следующем выражении:

$$P_{II} = P(\Gamma / \Gamma') = \int_{-\infty}^{x_{\min}} P_\Gamma(x) dx + \int_{x_{\max}}^{+\infty} P_\Gamma(x) dx + \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} P_\beta(x) dx. \quad (5)$$

Ошибка первого рода будет оцениваться выражением (6):

$$P_I = P(\Gamma' / Б) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} P_B(x) dx. \quad (6)$$

Применительно к опыту с покрытием поршня помимо данных параметров, согласно той же методике [14], добавим следующую диаграмму (рис. 3).

Аналогично  $K, H_k$  — исходное состояние диагностируемого объекта (соответственно покрытие обладает либо не обладает каталитическими свойствами),  $K', H_k'$  — вывод о его состоянии после испытания, соответственно каталитический эффект имеется либо нет.

Ошибки первого и второго рода также будут аналогичны методике [14]. Представим их в виде следующих выражений:

$$P_I = P(K' / H_k) \quad (7)$$

$$P_{II} = P(H_k' / K). \quad (8)$$

Каталитическое действие в данном случае будем оценивать по двум параметрам — выбросам CO и  $C_xH_x$ . Покрытие имеет незначительное влияние на выбросы  $NO_x$ . Поэтому в данном случае этими показателями можно пренебречь [2, 3, 9].

Плотность распределения параметров отображают следующие диаграммы (рис. 4).

Исходные положительные и отрицательные, а также варианты ошибок аналогичны методике работы [14], соответственно, и графики на рис. 4 принимают аналогичный вид.

Отсюда следует, что вероятность правильного решения будет определяться следующими интегралами:

$$P(K' / K) = \int_{CO_{\min}}^{CO_{\max}} P_K(CO) d(CO), \quad (9)$$

$$P(K' / K) = \int_{CH_{\min}}^{CH_{\max}} P_K(CH) d(CH). \quad (10)$$

Аналогично выражению (5) ошибки II рода будут определяться как

$$P_{II} = P(H_k' / K) = \int_{-\infty}^{CO_{\min}} P_K(CO) d(CO) + \int_{CO_{\max}}^{+\infty} P_{H_k}(CO) d(CO), \quad (11)$$

$$P_{II} = P(H_k' / K) = \int_{-\infty}^{CH_{\min}} P_K(CH) d(CH) + \int_{CH_{\max}}^{+\infty} P_{H_k}(CH) d(CH). \quad (12)$$

Ошибки первого рода аналогично (6):

$$P_I = P(H_k' / K) = \int_{CO_{\min}}^{CO_{\max}} P_{H_k}(CO) d(CO), \quad (13)$$

$$P_I = P(H_k' / K) = \int_{CH_{\min}}^{CH_{\max}} P_{H_k}(CH) d(CH). \quad (14)$$

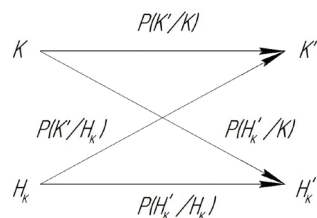


Рис. 3. Диаграмма результатов диагностического эксперимента для каталитических покрытий

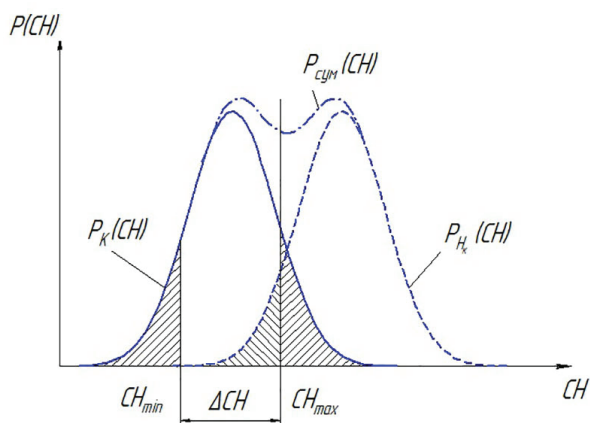
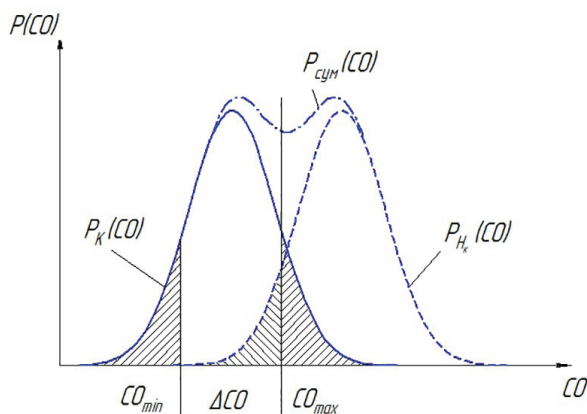


Рис. 4. Распределение параметров для анализа влияния каталитического покрытия на выбросы окиси углерода и углеводородов

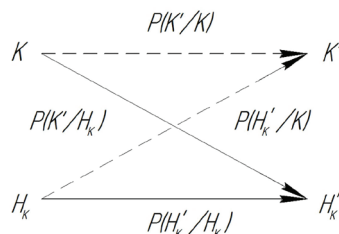


Рис. 5. Вид диаграммы при неисправном двигателе

В случае неисправности ДВС диаграмму возможно будет представить в следующем виде (рис. 5). Пунктирные линии в данном случае обозначают решение, которое теоретически возможно, но из-за неисправности исключается.

При неисправности ДВС, связанных с определением расхода топлива, рабочим процессом или неисправностью измерительного оборудования ва-

рианты  $P(K^1/K)$  и  $P(K^1/H_k)$  исключаются. Отсюда следует, что испытывать каталитические покрытия поршня необходимо на исправном двигателе, особенно в плане рабочего процесса.

Известно, что ошибки I и II рода всегда обусловлены многочисленными факторами, а их количественные характеристики имеют статистический характер [14].

**Влияние ошибок на параметры.** Ошибки первого рода приводят к неоправданным проверочным операциям и разборочно-сборочным работам. В случае нанесения каталитических покрытий ошибки приводят к экономическим затратам на электролиты и каталитические материалы. При этом, даже если отдельные детали узлов и агрегатов двигателя не проходят процедуру ремонта, сама разборочно-сборочная операция снижает срок службы на 20 % [14].

При ошибках второго рода возрастает простой лабораторного оборудования, что приводит к снижению производительности, а простой ДВС при неправильной оценке его технического состояния вызовет увеличение затрат на топливо, а также ухудшение экологических показателей (рис. 5).

**Выводы.** При испытании модифицированных каталитическим покрытием поршней важную роль играет техническое состояние ДВС. Установлено, что для получения достоверной информации в сфере испытания каталитических покрытий состояние ДВС должно быть исправным и подходящим для стендовых испытаний. После испытаний покрытие возможно испытать в условиях реальной эксплуатации.

#### Библиографический список

1. Ведрученко В. Р., Литвинов П. В. Анализ требований к нормативам выбросов вредных веществ // Архитектура, строительство, транспорт: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Омск: Изд-во СибАДИ, 2015. С. 970–976.
2. Ведрученко В. Р., Иванов А. Л., Борисов В. А., Литвинов П. В. Влияние материала поршня на процесс сгорания топлива в двигателе // Вестник СибАДИ. 2016. № 5 (51). С. 61–68.
3. Borisov V. A., Sigaeva S. S., Anoshkina E. A., Ivanov A. L., Litvinov P. V., Vedruchenko V. R., Temerev V. L., Arbuzov A. B., Kuznetsov A. A., Mukhin V. A., Suprunov G. I., Chumycho I. A., Shlyapin D. A., Tsyru'nikov P. G. Plasma electrolytic oxide coatings on silumin for oxidation CO // Oil and gas engineering (OGE-2017). AIP Conference Proceedings. 020001. 2017. Vol. 1876. DOI: 10.1063/1.4998821.
4. Борисов В. А., Иванов А. Л. Обоснование выбора материала катализатора для повышения экологической безопасности ДВС // Архитектура, строительство, транспорт: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Омск: Изд-во СибАДИ, 2015. С. 967–970.
5. Певнев Н. Г., Понамарчук В. В. Влияние водородсодержащей добавки к основному моторному топливу на экологические показатели автомобильного двигателя // Вестник СибАДИ. 2017. № 3 (55). С. 99–105.
6. Марченко А. П., Шпаковский В. В. Влияние корундового слоя на рабочих поверхностях поршней на процесс сгорания в ДВС // Двигатели внутреннего сгорания. 2011. № 2. С. 24–28.
7. Ciniviz M. [et al.]. Ceramic coating applications and research fields for internal combustion engines // Ceramic coatings – applications in engineering. 2012. DOI: 10.5772/29993. URL: [http://www.intechopen.com/books/ceramic-coatings-applications-in-engineering/ceramic-coating-applications-and-](http://www.intechopen.com/books/ceramic-coatings-applications-in-engineering/ceramic-coating-applications-and-research-fields-for-internal-combustion-engines)

research-fields-for-internal-combustion-engines (дата обращения: 03.10.2016).

8. Hu Z, Ladommatos N. In-Cylinder catalysts – a novel approach to reduce hydrocarbon emissions from spark-ignition engines // SAE Technical Paper 952419. 1995. DOI 10.4271/952419.
9. Zeng W., Xie M. A novel approach to reduce hydrocarbon emissions from the HCCI engine // Chemical engineering journal. 2008. Vol. 139, Issue 2. P. 380–389.
10. Osipov A. R., Borisov V. A., Suprunov G. I., Mukhin V. A., Ivanov A. L., Sigaeva S. S., Anoshkina E. A., Temerev V. L., Hohlov A. A., Tsyru'nikov P. G. Catalytic coatings for improving the environmental safety of internal combustion engines // Procedia Engineering. 2016. Vol. 152. P. 59–66.
11. S. Narasima Kumar. Experimental investigation of two stroke copper coated spark ignition engine with gasoline and gasohol // International Journal of Emerging Science and Engineering (IJESE). 2014. Vol. 2, issue 5. P. 1–7.
12. Каракозов Э. С., Чавдаров А. В., Барыкин Н. В. Микродуговое окисление — перспективный процесс получения керамических покрытий // Сварочное производство. 1993. № 6. С. 4–7.
13. Ведрученко В. Р., Иванов А. Л., Борисов В. А., Литвинов П. В. Анализ путей образования вредных веществ в отработавших газах поршневых двигателей // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 36–39.
14. Чебоксаров А. Н. Достоверность как критерий эффективности диагностирования транспортных и технологических машин // Вестник СибАДИ. 2016. № 5 (51). С. 61–68.

**ЛИТВИНОВ Павел Васильевич**, аспирант кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного университета путей сообщения (ОмГУПС); инженер по испытанию II категории Омского моторостроительного конструкторского бюро.

SPIN-код: 6686-8625

AuthorID (РИНЦ): 873778

Адрес для переписки: p\_vasilich55@mail.ru

**ВЕДРУЧЕНКО Виктор Родионович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС.

SPIN-код: 1462-4926

AuthorID (РИНЦ): 514202

Адрес для переписки: vedruchenkovr@mail.ru

**БОРИСОВ Вадим Андреевич**, кандидат химических наук, старший преподаватель кафедры «Химическая технология и биотехнология» Омского государственного технического университета; научный сотрудник Института проблем переработки углеводородов СО РАН, г. Омск.

SPIN-код: 9750-2492

AuthorID (РИНЦ): 684828

Адрес для переписки: borisovtiger86@mail.ru

**ШТИБ Алексей Викторович**, аспирант кафедры «Теплоэнергетика» ОмГУПС.

SPIN-код: 6654-0400

AuthorID (РИНЦ): 904940

Адрес для переписки: shtib93@mail.ru

#### Для цитирования

Литвинов П. В., Ведрученко В. Р., Борисов В. А., Штиб А. В. Оценка работоспособности двигателя внутреннего сгорания с критериями диагностирования для испытания модифицированных поршней в лабораторных условиях // Омский научный вестник. 2018. № 3 (159). С. 10–13. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-159-10-13.

Статья поступила в редакцию 27.02.2018 г.

© П. В. Литвинов, В. Р. Ведрученко, В. А. Борисов, А. В. Штиб