

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ПОРШНЕЙ ДВУХТАКТНЫХ ДВС К ПРОГАРУ ПОСРЕДСТВОМ НАНЕСЕНИЯ МДО-ПОКРЫТИЙ

*Р.С. Валеев, гл. конструктор АО «Русская механика», г. Рыбинск.
Р.Д. Еникеев, д.т.н., профессор, зав. кафедрой
Р.Ю. Сакулин, к.т.н., доцент кафедры
Уфимский государственный авиационный технический университет*

Существенная проблема форсированных двухтактных двигателей с искровым зажиганием — прогар поршней. Одним из методов решения этой проблемы являются термобарьерные покрытия, формируемые методом микродугового оксидирования (МДО). Проведены исследования, подтверждающие способность МДО-слоя на днище поршня повышать устойчивость к прогару поршней двухтактных бензиновых двигателей. Показано, что МДО-слой не оказывает влияния на основные характеристики поршневого двухтактного бензинового двигателя: эффективный крутящий момент, эффективную мощность, удельный эффективный расход топлива, температуру под свечой зажигания, состав отработавших газов.

Введение

Двухтактные двигатели с искровым зажиганием являются одним из основных источников энергии там, где вес, удельная мощность и простота конструкции — основополагающие факторы. Поэтому этот тип двигателей широко используется в снегоходной технике, двухколесных транспортных средствах, небольших лодках и внедорожных мотоциклах. [1]. Двухтактные бензиновые двигатели отличаются высокой теплонапряженностью. По сравнению с четырехтактными двигателями уровень температур в камере сгорания и, соответственно, днища поршня, значительно выше [2]. Кроме того, поверхность поршня находится в постоянном контакте с топливом и маслами, что оказывает коррозионно-агрессивное воздействие на днище [3]. Эти факторы могут привести к повреждению поршня. Наиболее опасное повреждение — прогар днища поршня. Прогар представляет собой разрушение поверхности днища поршня в результате резкого нарастания давления и температуры в камере сгорания двигателя [4–6]. Таким образом, создание высокоэффективных термозащитных покрытий для днища поршня — актуальная задача современного двигателестроения.

Существуют различные способы нанесения термозащитных покрытий на алюминиевые

поршневые сплавы, такие как плазменное напыление [7], магнетронное распыление [8], электронно-лучевое осаждение из паровой фазы [9]. Однако покрытия, формируемые этими способами, не обеспечивают достаточную толщину и адгезию покрытия с материалом поршня, в результате чего тепловая защита становится неэффективной. Возможным решением этой научно-технической задачи может стать нанесение на поверхности днища поршней наноструктурных керамических покрытий методом микродугового оксидирования (МДО).

Технология МДО реализуется в электролите. В результате сложных электрохимических процессов на поверхности детали происходит образование микроразрядов, благодаря которым формируется модифицированный поверхностный слой (покрытие). Методом МДО получают покрытия, состоящие из оксидов алюминия и кремния толщиной до 400 мкм [10–12]. Такие поверхностные слои позволяют в значительной мере повысить термостойкость поршня и предотвратить прогар его днища при высоких температурах, которые возникают при горении обедненной смеси до значения $\alpha = 0,9–0,95$ [13–15]. Однако исследований, посвященных влиянию МДО-слоя на стойкость к прогару днища поршней двухтактных двигателей, крайне мало.

Цель данной работы — исследование влияния МДО-слоя на поршнях двухтактного двигателя на их стойкость к прогару, а также эффективные и экологические характеристики двигателя при работе на различных скоростных и нагрузочных режимах.

Экспериментальная установка и методика испытаний

Исследования стойкости поршней с МДО-слоем к прогару и влияние МДО-слоя на эффективные и экологические характеристики проводились на двигателях РМЗ-550 и РМЗ-551i, применяемых на снегоходах. Технические характеристики двигателей представлены в табл. 1.

Экспериментальная установка, предназначенная для испытаний двигателей РМЗ-550 и РМЗ-551i, базировалась на нагрузочном стенде AVL-DP 80, который позволяет измерять крутя-

Таблица 1

Технические характеристики двигателей

Модель	PM3-550	PM3-551i
Объем, см ³ / Цилиндры	553 / 2	553 / 2
Мощность, л.с.	50	60
Тип	2-тактный	2-тактный
Диаметр цилиндра × ход поршня, мм	76×61	76×61
Топливная система	1-карбюраторная	Распределенный впрыск
Карбюратор / тип	Mikuni / поплавковый	-
Охлаждение	воздушное	Жидкостное
Система выпуска	Глушитель с резонатором	Глушитель с резонатором
Система впуска	Лепестковый клапан	Лепестковый клапан
Система смазки	Совместная	Раздельная

ший момент двигателя до значения 200 Н·м и скорость вращения до 10 000 об/мин [16]. Кроме того, нагрузочный стенд был оборудован устройством, позволяющим дистанционно управлять дроссельной заслонкой двигателя, что обеспечивало удобное изменение рабочих режимов. Двигатель соединен с нагрузочным устройством через вал отбора мощности (рис. 1). Расход топлива регистрировался системой AVL fuel balance, подключенной в качестве топливного бака, с программным обеспечением AVL, установленном на персональном компьютере [17]. Результаты измерения передавались на ЭВМ и фиксировались в реальном времени. Для анализа состава отработавших газов использовался газоанализатор «Инфракрас 5М2» [18], который позволяет регистрировать следующие компоненты: CO, CH, NO_x, CO₂, O₂. Зонд газоанализатора устанавливался в выпускную трубу на расстоянии

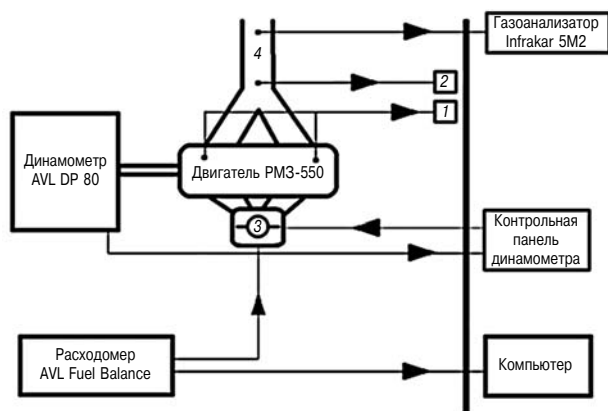


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для испытаний двигателя PM3-550:

1 — указатель температуры под свечами ТРМ-200; 2 — указатель температуры отработавших газов ТРМ-200; 3 — дроссельная заслонка двигателя; 4 — выпускной трубопровод

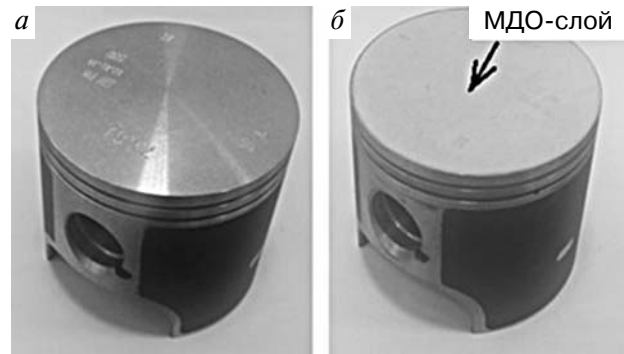


Рис. 2. Поршни двигателя PM3-550 до испытаний: а — штатный; б — модифицированный с МДО-слоем

300 мм от ее края. Для измерения температуры под свечами на обоих цилиндрах двигателя были установлены термодатчики, соединенные с прибором ТРМ-200 [19]. Температура отработавших газов фиксировалась термодатчиком, соединенным с аналогичным прибором ТРМ-200.

Двигатель испытывался с комплектами поршней двух типов:

- > штатные поршни без МДО (рис. 2, а);
- > модифицированные поршни с МДО-слоем на днище (рис. 2, б).

Штатные поршни австрийского производства были изготовлены из алюминиевого сплава марки M244 с содержанием кремния Si ~26 % [4]. Модифицированные поршни были выполнены на базе штатных посредством нанесения МДО-слоя в силикатно-щелочном электролите по технологии, разработанной в УГАТУ. Толщина МДО-слоя измерялась вихретоковым толщиномером ТТ-210 и составила 130±10 мкм.

Исследование поршней на стойкость к прогару проводилось на режиме максимальной мощности двигателя: полное открытие дроссельной заслонки и частота вращения коленчатого вала 6500 об/мин. В качестве показателя стойкости поршней к прогару было выбрано время работы двигателя на режимах, неизбежно приводящих к прогару штатных поршней. Эти режимы реализуются за счет обеднения горючей смеси [20]. Обеднение горючей смеси при испытании двигателя PM3-550, оборудованного карбюраторной топливной системой, достигается двумя способами:

- > установка в карбюратор главного топливного жиклера (ГТЖ) с уменьшенным проходным сечением (чем меньше значение цифры в маркировке ГТЖ, тем беднее горючая смесь);
- > смещение фиксатора дозирующей иглы из среднего положения (канавка 3) в верхнее (канавка 2).

Обеднение горючей смеси приводит к росту температуры в цикле и повышению температуры стенок.

Результаты испытаний двигателя со штатными поршнями и с поршнями с МДО-слоем на днище

Вид поршней	Наработка на режиме, мин	P_e , л. с.	b_e , г/л.с·ч	T_s правый цилиндр, °С	T_s левый цилиндр, °С	$T_{ог}$
Режим 1						
Серийные	60	42,5	337	150	162	752
С МДО-слоем	60	42,3	353	186	183	760
Режим 2						
С МДО-слоем	60	40,2	351	197	201	763
Режим 3						
Серийные	25 Прогар правого поршня	42	330	178	175	790
С МДО-слоем	60	40,7	313	180	175	782
Режим 4						
С МДО-слоем	60	43,5	342	194	215	773

Для испытания комплектов поршней были определены четыре режима работы двигателя, реализующих условия, приводящие к прогару штатных поршней, в том числе для сравнения, один режим с базовыми настройками топливной аппаратуры, обеспечивающими долговременную работу двигателя. На каждом режиме фиксировались основные характеристики двигателя: эффективная мощность — P_e , эффективный удельный расход топлива — b_e , температура под свечами — T_s , температура отработавших газов — $T_{ог}$. Запланированная продолжительность работы двигателя на каждом режиме составляла 60 минут. Характеристики режимов приведены ниже:

1-й режим. Базовые настройки топливной аппаратуры (используемые на серийных двигателях). ГТЖ-370, фиксатор иглы расположен в 3 канавке. УОЗ не изменялся.

2-й режим. ГТЖ-340, фиксатор иглы расположен в 3 канавке. УОЗ не изменялся.

3-й режим. ГТЖ-320, фиксатор иглы расположен в 3 канавке. УОЗ не изменялся.

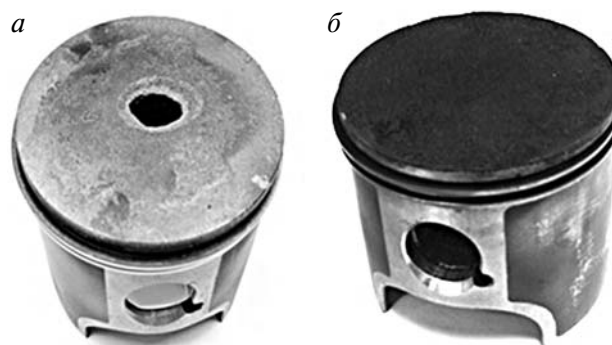
4-й режим. ГТЖ-370, фиксатор иглы расположен во 2 канавке. УОЗ не изменялся.

Исследование влияния МДО-слоя на эффективные и экологические характеристики двигателя также проводилось на двух комплектах поршней. Скоростные режимы были определены в диапазоне от 3000 до 6750 об/мин. В качестве нагрузочных режимов были выбраны значения 100, 60 и 40 % открытия дроссельной заслонки как наиболее часто используемые при эксплуатации снегохода. На каждом режиме фиксировались основные характеристики двигателя: эффективный крутящий момент — M_e , эффективная мощность — P_e , эффективный удельный расход топлива — b_e и концентрация токсичных компонентов в отработавших газах. На каждом режиме двигатель выдерживался до стабилизации температур под свечами зажигания.

Результаты эксперимента

Во время проведения испытаний на стойкость поршней к прогару было зафиксировано, что у двигателя со штатными поршнями и с модифицированными поршнями с МДО-слоем при работе на режиме 1 после 60 минут работы прогар поршней не возникал. При работе на режиме 3 прогар штатного поршня возник на 25 минуте работы, а у поршня с МДО прогар не наблюдался и через 60 минут на режимах со 2 по 4, несмотря на обеднение топливовоздушной смеси. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

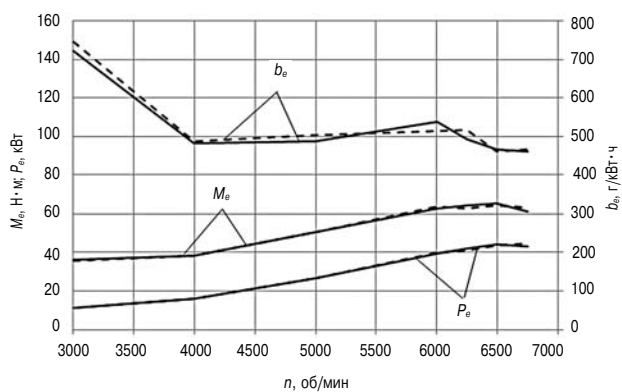
На рис. 3 показаны штатный поршень без МДО-слоя (рис. 3, а) и поршень с МДО-слоем (рис. 3, б), после работы на режиме 3. На поверх-


Рис. 3. Поршни двигателя РМЗ-550:

а — штатный после испытаний (с прогаром); б — с МДО-слоем на поршне после испытаний (без прогара)

ности днища штатного поршня четко виден прогар в виде отверстия неправильной формы (рис. 3, а). На поверхности поршня с МДО-слоем прогара не наблюдается (рис. 3, б)

Результаты исследования влияния МДО-слоя на эффективные и экологические характеристики двигателя при полном открытии дроссельной


Рис. 4. Крутящий момент, мощность и эффективный удельный расход топлива при полном открытии дроссельной заслонки

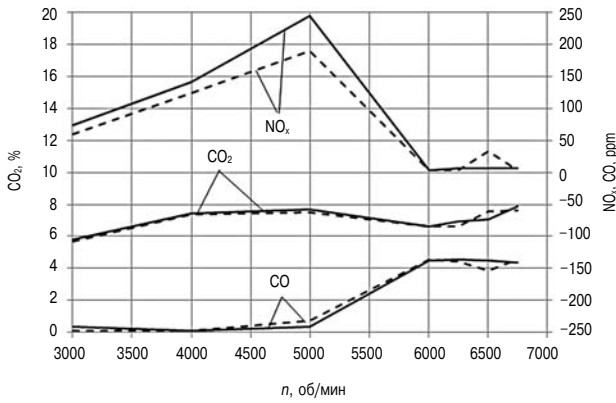


Рис. 5. Эмиссия CO, CO₂ и NO_x при полном открытии дроссельной заслонки

заслонки показаны на рис. 4 и 5. Данные для штатных поршней — сплошные линии, для модифицированных поршней с МДО-слоем на днище — штриховые линии.

Видно, что при работе на поршнях с МДО-слоем не происходит существенных изменений эффективных показателей (наибольшее отклонение не превышает 4 %), при этом отмечается не-

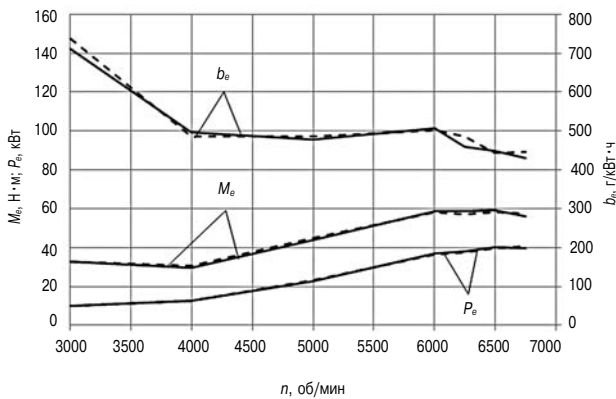


Рис. 6. Крутящий момент, мощность и эффективный удельный расход топлива при 60 %-ном открытии дроссельной заслонки

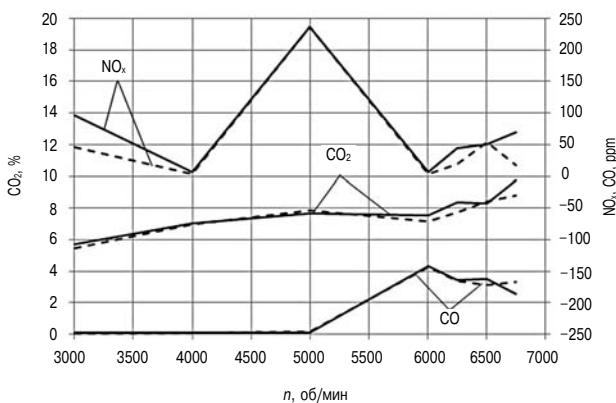


Рис. 7. Эмиссия CO, CO₂ и NO_x при 60 %-ном открытии дроссельной заслонки

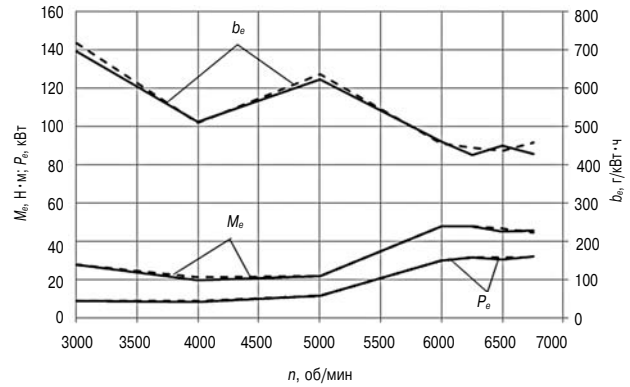


Рис. 8. Крутящий момент, мощность и эффективный удельный расход топлива при 40 %-ном открытии дроссельной заслонки

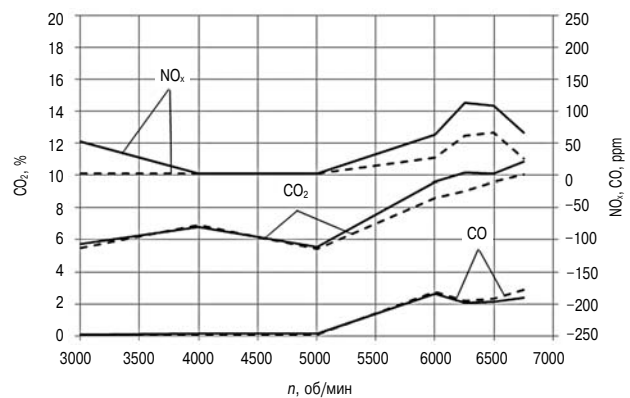


Рис. 9. Эмиссия CO, CO₂ и NO_x при 40 %-ном открытии дроссельной заслонки

большое снижение эмиссии NO_x на средних скоростях.

На рис. 6 и 7 приведены эффективные характеристики двигателя и эмиссия токсичных компонентов для 60 % открытия дроссельной заслонки. Здесь также нет существенного расхождения эффективных показателей (не более 5 %), в то время как эмиссия NO_x при работе на поршнях с МДО-слоем несколько понизилась на малых и высоких скоростях вращения. Аналогичная картина наблюдается также и при работе на 40 % открытия дроссельной заслонки (рис. 8 и 9).

Выводы

1. В ходе экспериментов установлено, что при работе на режиме с существенным обеднением смеси (ГТЖ 320) штатный поршень прогорел после 25 минут работы, тогда как поршень с МДО-слоем проработал по 60 минут на всех режимах с обеднением горючей смеси, и повреждения на его поверхности отмечены не были. Этот факт показывает способность МДО повышать стойкость поршней к прогару за счет формирования на днище поверхностного слоя с низким коэффициентом теплопроводности.

2. Визуальный анализ поверхности поршня с МДО-слоем показал, что покрытие обладает высокой адгезионной прочностью в условиях ДВС, так как сколы и отслоения на поверхности отсутствуют (рис. 3, б).

3. Наличие МДО-слоя практически не влияет на показатели двигателя. Основные его характеристики (крутящий момент, мощность и расход топлива) при работе на всех исследуемых режимах меняются незначительно.

4. Наличие теплозащитного МДО-слоя не оказывает существенного негативного влияния на выбросы CO и CO₂. При этом отмечается некоторое снижение выбросов NO_x, что может быть объяснено изменением теплового состояния в рабочем процессе при применении МДО, либо каталитическим действием, которое, возможно, МДО оказывает на процесс горения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках соглашения № 14.574.21.0161 от 26.09.2017 при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (уникальный идентификатор работы (проекта) RFME-F157417X0161).

Работа выполнена с привлечением оборудования ЦКП «Нанотех» ФГБОУ ВО УГТУ.

Литература

1. Martins J., Pereira C., Brito F. A New Rotary Valve for 2-Stroke Engines Enabling Over-Expansion, SAE Technical Paper 2016-01-1054, 2016.
2. Singh O.P., Umbarkar Y., Sreenivasulu T., Vetrivendan E., Kannan M., Babu Y.R. Piston seizure investigation: Experiments, modeling and future challenges, Engineering Failure Analysis, 28, 2013. P. 302–310.
3. Kaiser M.S., Swagata Dutta. Comparison of corrosion behaviour of commercial aluminium engine block and piston in 3,5 % NaCl solution, MSEJ, Vol. 1, № 1, 2014.
4. Pistons and engine testing, MAHLE GmbH, 2012.
5. Tomasz A., Piotr L. Selected failures of internal combustion engine pistons, Logistyka, 3, 2015. P. 48–55.
6. Ayatollahi M.R., Mohammadi F., Chamani H.R. Thermo-Mechanical Fatigue Life Assessment of a Diesel Engine Piston, International Journal of Automotive Engineering. 2011. № 4, P. 256–266.
7. Bai Y., Zhao L., Wang Y., Chen D., Li B.Q., Han Z.H. Fragmentation of in-flight particles and its influence

on the microstructure and mechanical property of YSZ coating deposited by supersonic atmospheric plasma spraying // Journal of Alloys and Compounds. 2015. № 632. P. 794–799.

8. Wei Li, Ping Liu, Yongsheng Zhao, Fengcang Maa, Xinkuan Liu, Xiaohong Chen, Daihua He. Structure, mechanical properties and thermal stability of CrAlN/ZrO₂ nanomultilayers deposited by magnetron sputtering // Journal of Alloys and Compounds. 2013. № 562, P. 5–10.

9. Limin He, Xin Zhou, Bintao Zhong, Zhenhua Xu, Rende Mua, Guanghong Huang, Xueqiang Cao. Phase evolution, interdiffusion and failure of La₂(Zr_{0.7}Ce_{0.3})₂O₇/YSZ thermal barrier coatings prepared by electron beam-physical vapor deposition // Journal of Alloys and Compounds. 2015. № 624. P. 137–147.

10. Ernst P., Distler B. Optimizing the Cylinder Running Surface, SAE International, 9, 2012.

11. Yerokhin A., Khan R.H.U. Anodising of Light Alloys, Surface Engineering of Light Alloys: Aluminum, Magnesium and Titanium Alloys. Woodhead Publishing, Cambridge, 2010. P. 83–109.

12. Yerokhin A.L., Nie X., Leyland A., Matthews A., Doney S.J. Plasma electrolysis for surface engineering, Surface and Coatings Technology. 1999. № 122. P. 73–93.

13. Dudareva N.Yu., Butusov I.A., Kalschikov R.V., Grin R.R., Alexandrov I. V., Musin F.F. The Investigation of the Effect of Micro-Arc Oxidation Modes on the Adhesion Strength of Coatings // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2014. № 7. P. 5–8.

14. Dudareva N.Yu., Enikeev R.D., Ivanov V.Yu. Thermal Protection of Internal Combustion Engines Pistons, Procedia Engineering. 2017. № 206. P. 1382–1387.

15. Rozhdestvensky Y., Lazarev E., Doikin A. Effect of the Heat Insulating Coating of the Piston Crown on Characteristics of the Piston–Cylinder Liner Pair, Procedia Engineering. 2016. № 150. P. 541–546.

16. AVL DynoPerform Load system with eddy current dynamometers, <https://www.avl.com/load-unit-for-engine-testing> (дата обращения 04.11.2019).

17. AVL fuel balance, fuel consumption measurement, <https://www.avl.com/documents/10138/2699442/Product+Description+Fuel+Balance> (дата обращения 04.11.2019).

18. Автомобильный 5-ти компонентный газоанализатор «Инфракар 5М-2.01», <http://www.infacar.ru/products/group24/product24.htm> (дата обращения 04.11.2019).

19. TPM200 двухканальный измеритель с универсальным входом и RS-485, <https://www.owen.ru/product/trm200> (дата обращения 04.11.2019).

20. Heywood, J. Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill, USA, 1988.