

Транспортное и энергетическое машиностроение

УДК 621.43.016.4: 536.24

Методика моделирования нестационарного высокочастотного температурного состояния поршня двигателя внутреннего сгорания

А.П. Марченко, В.В. Пылёв

Низкотеплопроводные покрытия поверхности камеры сгорания являются перспективным средством улучшения показателей двигателей внутреннего сгорания. Однако осуществлению моделирования нестационарного высокочастотного температурного состояния деталей при учете возникающего эффекта частично-динамической теплоизоляции препятствует значительный объем вычислений. В данной работе предложена методика, согласно которой моделируемое температурное поле разделяется на расчетные области с различной постановкой задачи теплопроводности; установлены колебания температуры поверхности поршня с корундовым покрытием; определена динамическая составляющая теплоизолирующего эффекта. Применение приведенной методики позволяет уточнить расчет рабочего процесса двигателя.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, камера сгорания, частично-динамическая теплоизоляция, поршень, нестационарное высокочастотное температурное состояние.

Simulation Technique of Nonstationary High-frequency Temperature State of Piston of Internal Combustion Engine

A.P. Marchenko, V.V. Pylyov

The combustion chamber surface coatings with low heat-conductivity are a promising means of improving of internal combustion engine quality indexes.



МАРЧЕНКО

Андрей Петрович

(Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»)

MARCHENKO

Andrey Petrovich

(Kharkiv, Ukraine, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»)



ПЫЛЁВ

Вячеслав Владимирович

(Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»)

PYLYOV

Vyacheslav Vladimirovich

(Kharkiv, Ukraine, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»)

However simulation of nonstationary high-frequency temperature state of the combustion chamber components in the presence of the partially-dynamic heat insulation effect is impeded by a significant amount of computation. The article contains: (a) the method of simulation based on dividing the sought temperature field into zones with dissimilar heat-conductivity problem statement, (b) the calculated temperature oscillations of the piston surface with the ceramics coating, (c) the obtained dynamic part of the heat-insulating effect. Applying of the presented technique makes possible the engine workflow simulation improvement.

Keywords: internal combustion engine, combustion chamber, partially-dynamic heat insulation, piston, nonstationary high-frequency temperature state.

Характерная особенность современного двигателестроения — стремление к комплексному улучшению экономичности, экологичности и надежности двигателей внутреннего сгорания. Это возможно при использовании новых эффектов и разработке более точных математических моделей процессов, протекающих в двигателе.

Одним из перспективных способов подобного всестороннего улучшения является применение теплоизолирующих покрытий поверхности деталей камеры сгорания. До недавнего времени совершенствование конструкций в этом направлении сдерживалось низкой долговечностью собственно покрытий. Однако сегодня, с развитием технологий их образования на поверхности поршней, стало возможным достичь увеличения износостойкости как самих поршней, так и гильз цилиндров [1, 2].

Применение частично-динамической теплоизоляции обеспечивает снижение теплового потока в стенку камеры сгорания на основе уменьшения ее аккумулялирующего действия. При этом колебание поверхностной температуры приближено к колебанию температуры рабочего тела на протяжении цикла [1, 3]. При определенных условиях это влияет на наполнение цилиндра свежим зарядом, период задержки воспламенения топлива, его испарение в пристеночных зонах, на закон тепловыделения и выбросы вредных веществ [4, с. 119—124; 5, 6].

Следует отметить, что причиной значительного температурного колебания поверхностей может являться и слой нагара на них [7, 8].

Для учета влияния частично-динамической теплоизоляции на рабочий процесс, расчет ресурсной прочности, проектирование и оптимизацию конструкций с покрытием необходимо определить высокочастотное температурное состояние тела поршня.

Для решения задач стационарной и апериодической теплопроводности поршня в трехмерной постановке широко применяют различные программные комплексы, использующие метод конечных элементов. Однако расчет высокочастотной нестационарной теплопроводности такими методами, подобно [9], требует значительных затрат машинного времени, поскольку должен осуществляться последовательно на протяжении множества рабочих циклов до установления температурного поля. В свою очередь, теплоизоляция на детали предполагает несколько слоев элементов по ее толщине. При этом их требуемое количество выводит подобный расчет из числа выполнимых на персональном компьютере в практической инженерной деятельности.

Решение задачи становится возможным при снижении ее размерности. Так, например, в работах [1, 10] указанная задача поставлена и решена для одномерной стенки с граничными условиями и толщиной, соответствующими участку камеры сгорания поршня, где средний по поверхности поршня коэффициент теплоотдачи равняется среднецикловому локальному. Смоделировать температурное состояние для других зон камеры таким способом нельзя.

Существует методика [11, с. 88—111], согласно которой стационарное температурное поле детали и колебание температуры на ее поверхности определяются отдельно. Для этого в каждой исследуемой точке деталь заменяется полуограниченным телом. Недостаток данной методики — невозможность учета влияния колебания температуры теплоизоляции на ее среднее значение.

Целью статьи является разработка методики моделирования высокочастотного температурного состояния деталей камеры сгорания, учи-

тывающей эффект частично-динамической теплоизоляции ее поверхности.

Описание методики. С удалением от поверхности камеры сгорания размах температурного колебания в деталях, связанного с цикличностью рабочего процесса двигателя, снижается, и на некоторой глубине становится пренебрежимо малым. Поэтому моделировать температурное состояние по законам нестационарной теплопроводности представляется достаточным для поверхностной области тела Ω_1 определенной толщины Δ_b , которая превышает указанную выше глубину. Температура же другой части тела Ω_2 остается неизменной на протяжении цикла. При наличии эффекта частично-динамической теплоизоляции снижение высокочастотного колебания температуры по глубине детали происходит гораздо быстрее, чем для монометаллического аналога. Соответственно, толщина Δ_b может принимать существенно меньшие значения, сопоставимые с толщиной низкотеплопроводного слоя [12].

Предлагаемая методика строится на допущении, что тепловыми потоками, параллельными поверхности тела в области Ω_1 , ввиду ее малости, можно пренебречь. На этой основе задача теплопроводности для области Ω_1 заменяется комплексом задач в одномерной постановке. Эти задачи соответствуют нестационарным процессам в различных зонах камеры сгорания, обусловленным отличиями в условиях теплообмена и значениями толщин теплоизоляции. В области Ω_2 постановка задачи — трехмерная стационарная.

В соответствии с характером общей решаемой задачи, методика предполагает применение граничных условий 3-го рода. По поверхности камеры сгорания параметры α_r и T_r зависят от угла поворота коленчатого вала и пространственных координат. По остальным поверхностям граничные условия зависят только от пространственных координат.

Для решения каждой задачи в области Ω_1 на ее границе с Ω_2 задаются стационарные граничные условия 1-го рода. Произвольной температуре T_b в них можно поставить в соответствие вычисленный тепловой поток через поверхность контакта, получив функцию

$q_b = f_1(T_b)$. В свою очередь, при решении задачи в области Ω_2 применение граничных условий 2-го рода позволяет определить функцию $T_b = f_2(q_b)$. Можно показать, что точка выполнения условий 4-го рода на пересечении этих функций единственна и достижима в итерационном приближении.

Начальный расчет при этом рационально выполнять для области Ω_2 , задав локальные параметры граничных условий 3-го рода на границе областей согласно формулам

$$\alpha_b = \alpha_r / \left(1 + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \alpha_r \right); T_b = T_r,$$

где δ_n, λ_n — толщина и теплопроводность теплоизоляции; T_r, α_r — температура рабочего тела и коэффициент его теплообмена с областью Ω_1 .

Температурное состояние тела здесь, подобно [11], не будет учитывать динамический эффект от теплоизоляции. Он будет учтен после выполнения согласования расчетов для областей Ω_1 и Ω_2 .

Моделирование и его результаты. В соответствии с изложенной методикой было выполнено моделирование температурного состояния поршня дизеля 4ЧН12/14 на номинальном ($N_e = 100$ кВт; $n = 2\,000$ мин⁻¹) и частичном ($N_e = 40$ кВт; $n = 1\,000$ мин⁻¹) режимах его работы. На поверхности днища поршня из сплава АК12М2МгН (АЛ25) был образован корундовый слой толщиной $\delta_n = 0,24$ мм и теплопроводностью $\lambda_n = 2,85$ Вт / (м·К).

Область Ω_1 разделялась на девять расчетных зон. Было принято $\Delta_b = 1$ мм. Согласно [10] колебание температуры на этой глубине составляет 0,6 К.

Моделирование температурного состояния в области Ω_1 осуществлялось методом конечных разностей, а в области Ω_2 — методом конечных элементов.

Полученные стационарные температурные состояния в области Ω_2 поршня представлены на рис. 1. Колебания температуры поверхности камеры сгорания для ее характерных зон, отмеченных на рис. 1 номерами, приведены на рис. 2. Они были определены из нестационар-

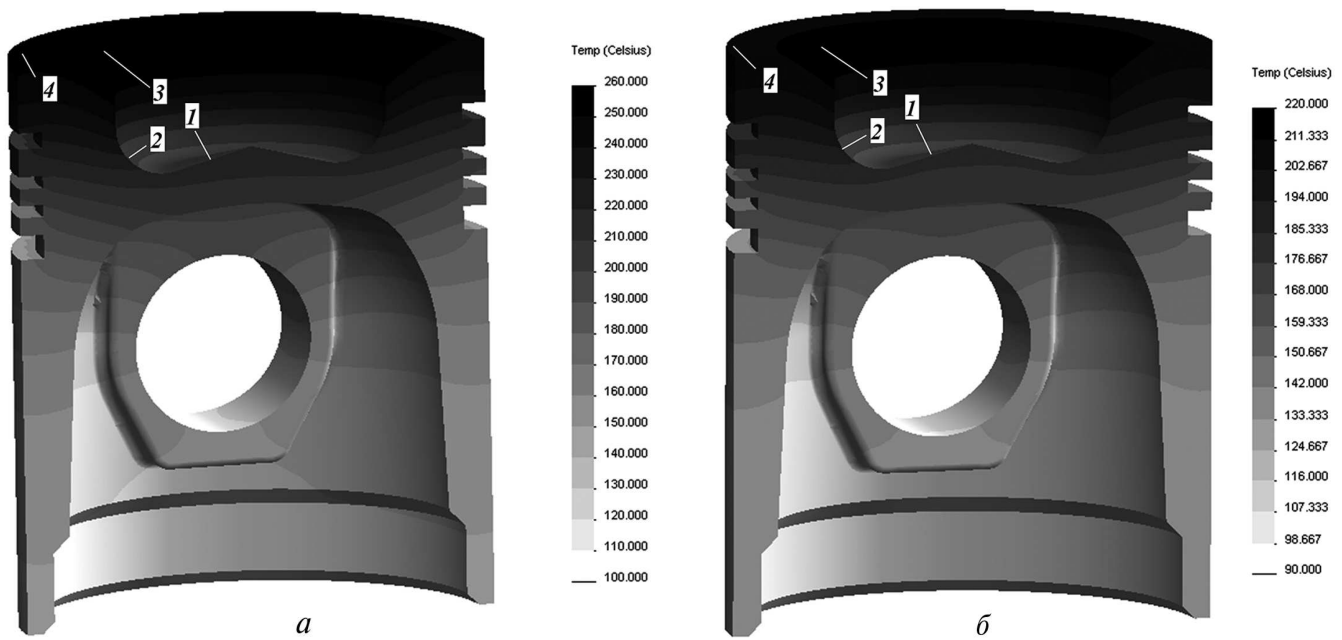


Рис. 1. Температурное состояние в области Ω_2 поршня на номинальном (а) и частичном (б) режимах работы дизеля 4ЧН12/14

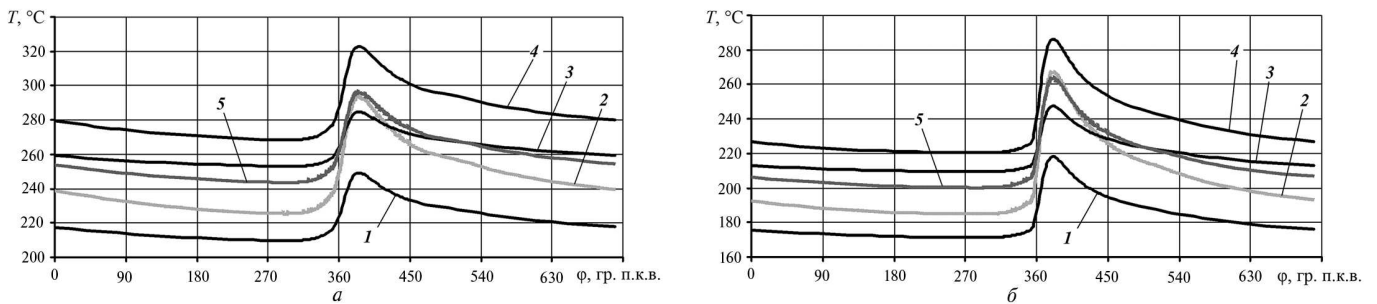


Рис. 2. Колебание температуры поверхности камеры сгорания на номинальном (а) и частичном (б) режимах работы дизеля 4ЧН12/14:
1–4 — локальные зоны, указанные на рис. 1; 5 — среднее по поверхности значение

ных полей температур области Ω_1 . Максимальный размах колебания для исследуемых режимов соответственно составляет 68 и 82 К.

На этой основе возможно определить среднюю по поверхности камеры сгорания мгновенную температуру (кривая 5 на рис. 2). Характерно, что полученные средние размахи колебаний 52 и 63 К отличаются от полученных в одномерном расчете на значения, близкие к 3 К.

Анализ температурного состояния поршня на глубине $\Delta_b = 1$ мм от поверхности позволил установить снижение температуры теплоизолированного поршня по сравнению с традиционным. Это снижение представлено на рис. 3 и достигает для рассматриваемых режимов со-

ответственно 7,8 и 5,8 К. На рисунке видно, что при исследуемой толщине теплоизоляции динамическая составляющая эффекта существенна и, для большей части значений координаты l , отложенной от оси поршня вдоль образующей камеры сгорания, превышает по значению статическую, составляя 40...80% общего значения.

Сравнение средних температур, определенных при решении одномерной задачи и с использованием предложенной методики, демонстрирует их значительное различие на номинальном режиме.

Выводы

1. Предложена методика моделирования высокочастотного температурного состояния

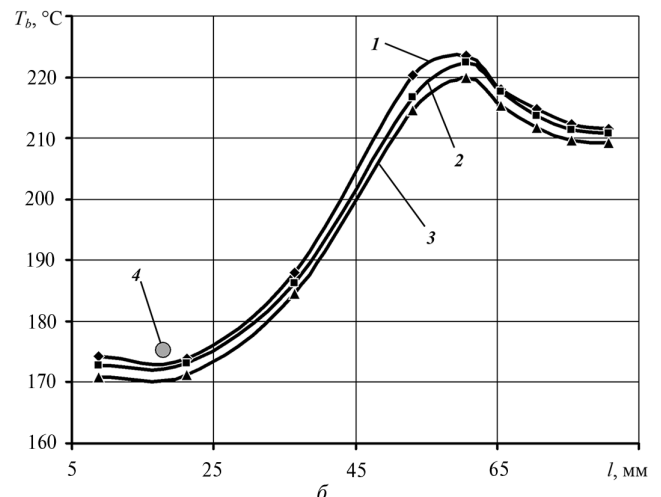
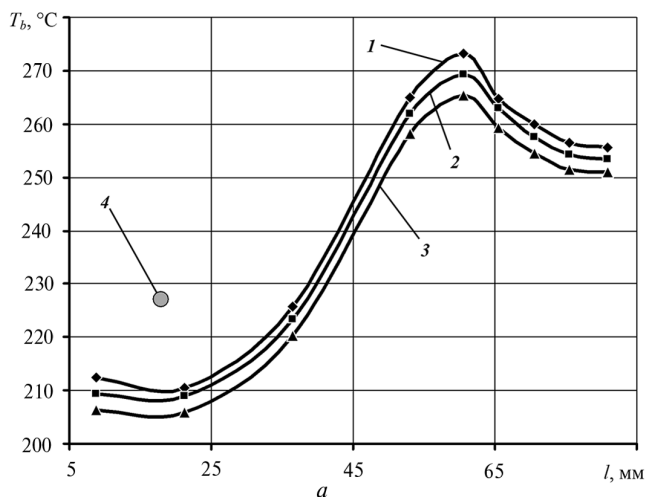


Рис. 3. Температура тела поршня на глубине 1 мм на номинальном (а) и частичном (б) режимах работы двигателя 4ЧН12/14:

1 — без покрытия; 2 — с покрытием, динамический эффект не учтен; 3 — с покрытием, динамический эффект учтен; 4 — при одномерной постановке задачи

деталей камеры сгорания, учитывающая эффект частично-динамической теплоизоляции их поверхности. Методика рекомендована для использования в комплексе как с 0-мерными моделями рабочего процесса двигателя, так и с высокоуровневыми 3D-CFD пакетами, поскольку позволяет установить законы изменения как средней, так и локальных температур поверхности камеры сгорания во времени.

2. Получены значения снижения температуры поршня с частично-динамической теплоизоляцией. Выделена их составляющая, обусловленная динамическим эффектом.

3. Установлено, что расчет нестационарного высокочастотного температурного состояния поршня в одномерной постановке допустим только для оценки размаха температурных колебаний его поверхности.

Литература

1. Шпаковский В.В. Научно-технические основы совершенствования показателей ДВС за счет применения поршней с корундовым шаром: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Харьков, 2010. 37 с.
2. Шпаковский В.В., Осейчук В.В. Влияние корундовой поверхности поршней дизеля тепловоза ЧМЭ-3 на эксплуатационные характеристики цилиндра-поршневой группы // Двигатели внутреннего сгорания. 2007. № 1. С. 101–105.
3. Grot K., Thiemann W. Beitrag zur Brennraumisolierung bei Viertakt Dieselmotoren // Motortechnische Zeitschrift. 1983. No 7/8. P. 287–298.
4. Костин А.К., Ларионов В.В., Михайлов В.И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания. Л.: Машиностроение, 1979. 222 с.
5. Шпаковский В.В. Влияние частично-динамической теплоизоляции на температурное состояние поверхности

поршня // Двигатели внутреннего сгорания. 2010. № 2. С. 92–95.

6. Парсаданов И.В., Поливянчук А.П. Оценка влияния гальваноплазменного покрытия поршня автотракторного дизеля на выбросы твердых частиц с отработавшими газами // Двигатели внутреннего сгорания. 2009. № 2. С. 97–100.

7. Онищенко Д.О. Улучшение эффективных и экологических показателей дизеля и снижение тепловых нагрузок на его основные детали: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 2012. 32 с.

8. Оцінка температурного стану стінки камери згорання поршня з шаром нагару / А.П. Марченко, В.В. Шпаковский, В.В. Пильов та ін. // Двигуни внутрішнього згорання. 2012. № 2. С. 37–41.

9. Пыль В.А., Белогуб А.В. Особенности термомеханического нагружения и учета ресурсной прочности тонкостенного поршня бензинового ДВС // Двигатели внутреннего сгорания. 2010. № 2. С. 74–81.

10. Оценка влияния режимных факторов на параметры температурного высокочастотного колебания в поверхностном корундовом слое поршня / А.П. Марченко, В.В. Шпаковский, И.И. Сукачев и др. // Двигатели внутреннего сгорания. 2010. № 1. С. 65–69.

11. Шеховцов А.Ф. Математическое моделирование теплопередачи в быстроходных дизелях. Харьков: Вища школа, 1978. 153 с.

12. Аналіз високочастотних коливань температури в поверхневому шарі поршня з теплоізолюючим покриттям / А.П. Марченко, В.О. Пильов, В.В. Шпаковский, В.В. Пильов // Двигуни внутрішнього згорання. 2008. № 1. С. 65–71.

Reference

1. Shpakovskii V.V. *Naukovo-tekhnicni osnovi polipshennia pokaznikov DVZ zastosuvanniam porshniv z korundovim sharom*. Avtoreferat diss. dokt. tekhn. nauk [Scientific and technical basis for performance improvement of internal combustion engines using pistons with corundum layer. Synopsis dr. sc. eng.]. Kharkiv, 2010. 37 p.
2. Shpakovskii V.V., Oseichuk V.V. *Vliianie korundovoi poverkhnosti porshnei dizelia teplovoza ChME-3 na ekspluatatsionnye kharakteristiki tsilindro-porshnevoi grupy* [Effect of alumina surface locomotive diesel engine pistons ChME-3 performance

cylinder-piston]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Internal Combustion Engines]. 2007, no. 1, pp. 101–105.

3. Grot K., Thiemann W. Beitrag zur Brennraumisolierung bei Viertakt Dieselmotoren. *Motortechnische Zeitschrift*. 1983, pp. 287–298.

4. Kostin A.K., Larionov V.V., Mikhailov V.I. *Teplonapriazhennost' dvigatelei vnutrennego sgoraniia* [Calorific combustion engines]. Leningrad, Mashinostroenie publ., 1979. 222 p.

5. Shpakovskii V.V. Vliianie chastichno-dinamicheskoi teploizolatsii na temperaturnoe sostoiianie poverkhnosti porshnia [Effect of partial dynamic thermal insulation on the state of the piston teperature]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Internal Combustion Engines]. 2010, no. 2, pp. 92–95.

6. Parsadanov I.V., Polivianchuk A.P. Otsenka vliianiia gal'vanoplazmennogo pokrytiia porshnia avtotraktorного дизеля на выбросы твердых частиц с отработавшими газами [Assessment of the impact piston galvanoplazmennogo coverage of Automotive diesel particulate matter in exhaust gases]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Internal Combustion Engines]. 2009, no. 2, pp. 97–100.

7. Onishchenko D.O. *Uluchshenie effektivnykh i ekologicheskikh pokazatelei dizelia i snizhenie teplovykh nagruzok na ego osnovnye detal'. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk.* [Improve the efficiency and environmental performance of diesel and reducing thermal loads on its main parts. Synopsis dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 2012. 32 p.

8. Marchenko A.P., Shpakovskii V.V., Pil'ov V.V., Matveenko V.V., Oboznii S.V. Otsinka temperaturnogo stanu stinki kamery zgorianniia porshnia z sharom nagaru [Evaluation of the temperature of the wall of the combustion chamber piston with a

layer of soot]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Internal Combustion Engines]. 2012, no. 2, pp. 37–41.

9. Pylev V.A., Belogub A.V. Osobennosti termomekhanicheskogo nagruzheniia i ucheta resursnoi prochnosti tonkostennogo porshnia benzinovogo DVS [Features thermomechanical loading and accounting resource strength of thin-walled piston petrol engine]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Internal Combustion Engines]. 2010, no. 2, pp. 74–81.

10. Marchenko A.P., Shpakovskii V.V., Sukachev I.I., Prokhorenko A.A., Kariagin I.N., Pylev V.V. Otsenka vliianiia rezhimnykh faktorov na parametry temperaturnogo vysokochastotnogo kolebaniia v poverkhnostnom korundovom sloe porshnia [Assessing the impact of regime factors on parameters of high-frequency oscillations of temperature in the surface layer of corundum piston]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Internal Combustion Engines]. 2010, no. 1, pp. 65–69.

11. Shekhovtsov A.F. *Matematicheskoe modelirovanie teploperedachi v bystrokhodnykh dizeliakh* [Mathematical modeling of heat transfer in high-speed diesel engines]. Khar'kov, Vyshha shkola publ., 1978. 153 p.

12. Marchenko A.P., Pil'ov V.O., Shpakovskii V.V., Pil'ov V.V. Analiz vysokochastotnykh kolyvan' temperatury v poverhnevomu shari porshnja z teploizoljuiuchym pokryttjam [Analysis of high-frequency oscillations of temperature in the surface layer of insulating coating piston]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia* [Internal Combustion Engines]. 2008, no. 1, pp. 65–71.

Статья поступила в редакцию 21.03.2013

Информация об авторах

МАРЧЕНКО Андрей Петрович (Харьков) — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания», проректор по научной работе. Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (61002, Харьков, Украина, ул. Фрунзе, 21, e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua).

ПЫЛЁВ Вячеслав Владимирович (Харьков) — аспирант кафедры «Двигатели внутреннего сгорания». Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» (61002, Харьков, Украина, ул. Фрунзе, 21, e-mail: vv3pylyov@i.ua).

Information about the authors

MARCHENKO Andrey Petrovich (Kharkiv) — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of «Internal Combustion Engines» Department. Pro-Rector for Research. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (Frunze str., 21, 61002, Kharkiv, Ukraine, e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua).

PYLYOV Vyacheslav Vladimirovich (Kharkiv) — Post-Graduate of «Internal Combustion Engines» Department. National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» (Frunze str., 21, 61002, Kharkiv, Ukraine, e-mail: vv3pylyov@i.ua).