

УДК 621.43.016.4

В.В. ШПАКОВСКИЙ, А.П. МАРЧЕНКО, В.В. ПЫЛЁВ

*Национальный технический университет «ХПИ», Харьков, Украина***РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПОРШНЯ С КЕРАМИЧЕСКИМ ПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ**

В работе приводится теоретическое обоснование повышения эффективности работы и ресурса двигателя при частичной теплоизоляции камеры сгорания, совершенствование математической модели описания нестационарной теплопроводности в поверхностном слое поршня двигателя внутреннего сгорания. Приведены результаты расчётов высокочастотных колебаний температуры на поверхности керамического слоя поршня и изменения амплитуды температурной волны в теле головки поршня для разных толщин керамического слоя. Полученные результаты достаточно близки к результатам исследований других авторов. При использовании на поверхности камеры сгорания тонкого керамического слоя происходит рост величины полного колебания температуры поверхности поршня при росте максимальной и уменьшении минимальной температуры; уменьшение глубины проникновения температурной волны в тело поршня; увеличение скорости изменения температуры поверхности поршня; уменьшение фазового сдвига температурной волны по отношению к мгновенной температуре рабочего тела в цилиндре двигателя.

Ключевые слова: двигатель, поршень, керамический слой, теплоизоляция, амплитуда, температурная волна, глубина проникновения.

Введение

Постановка проблемы. Проблема улучшения экономических показателей и повышения ресурса и двигателей внутреннего сгорания (ДВС) не является новой, и чрезвычайно обостряется в современных условиях. Улучшения экономических показателей добиваются путем улучшения рабочего процесса и снижения механических потерь, а повышения ресурса – путём снижения теплонапряжённости деталей камеры сгорания (КС).

Выделение нерешенных частей общей проблемы. Нерешенной частью проблемы является вопрос создания двигателя с улучшенными экономическими показателями за счёт теплоизоляции КС.

Анализ публикаций. Исследованиями по созданию адиабатного дизельного двигателя с использованием для теплоизоляции деталей КС стеклокерамики и нитрида кремния занимались R. Kamon, W. Buzzyk [1, 2]. Но для широкого использования такие детали оказались непригодными в основном из-за хрупкости и сравнительно высокой теплоёмкости. Ученые H. Valland, G.K. Wypianski, F.J. Wallace, T.K. Kao, W.A. Alexander, A.C. Cole and M. Tarabad университета г. Бат, Великобритания, опубликовали в 1982г. [3] и 1983г. [4] результаты исследований по использованию в качестве материала покрытий для теплоизоляции деталей КС стабилизированного циркония со следующими свойствами: $\lambda=2$ Вт/(м.К), $\rho=2800$ кг/м³,

$C=620$ Дж/(кг.К) $V=\lambda\rho c=3,5 \times 10^6$ кг.м/(сек⁴К) и низким коэффициентом теплового расширения. В результате исследований был сделан вывод, что для получения наиболее выгодных показателей по термодинамике рабочий цикл двигателя должен быть чисто адиабатным $\lambda\rho c=0$, то есть температура стенок КС должна изменяться вслед за изменением температуры газа в течение всего цикла. В этом случае тепловой поток будет направлен от газа к стенке или от стенки к газу в зависимости от мгновенной температуры газа, которая может быть выше или ниже температуры стенки КС. Расчёты, выполненные для стенки КС из циркония при $n=3000$ мин⁻¹, показали амплитуду изменения температуры 100 °С. В результате сделан общий вывод: чисто адиабатный режим работы двигателя не может быть достигнут ни при какой реальной конструкции стенок КС. Однако значительное увеличение к.п.д. (до 10%) может быть получено и при частичной тепловой изоляции КС [5]. Более поздние экспериментальные исследования немецких учёных G. Woschni, W. Spindler, K. Kolesa [6, 7] теплопереноса в ДВС с использованием поршня с головкой со слоем керамики нимоника-80А, толщиной 5 мм (с коэффициентом теплопроводности 2 Вт/(м.К) позволили установить, что колебания температуры на поверхности КС составили около 100К, средняя температура поверхности теплоизоляции равнялась 700 °С. Авторами установлено, что при высокой температуре поверхности пламя, поддерживаемое химическими

реакциями, приближается к стенке, вследствие чего коэффициент теплопередачи от рабочего тела к стенке значительно возрастает – происходит «конвективный всплеск». Поэтому эффекта теплоизоляции не происходит. Расчёты характеристик дизеля с турбонаддувом [1, 2], у которого поверхность КС в поршне покрыта слоем ZrO_2 ($\lambda=1,65$ Вт/(м·К) толщиной 5 мм позволили сделать вывод, противоположный авторам публикации [5] – практически невозможно получить снижение расхода топлива путём теплоизоляции стенок КС в поршне. С другой стороны, ещё до публикаций [1 – 5] исследования по применению эмалированных керамических покрытий (В.С. Чепиль, Я.И. Гордиенко) [11], керамических покрытий, полученным плазменным напылением окиси алюминия толщиной 0,2 – 0,9 мм, на огневой поверхности поршней толщиной 0,35 мм А.К. Костина, Е.В. Коллегова, М.Д. Никитина и других) [8, 9, 10], показали значительное снижение эффективного расхода топлива за счёт более полного сгорания и уменьшения потерь теплоты, снижение температурного уровня поршня.

Нерешенные вопросы. Несмотря на улучшение эффективности процесса сгорания и снижение тепловых потерь, покрытия не нашли широкого применения. Они не выдерживали длительных динамических нагрузок и отслаивались от огневой поверхности. По этой причине в работах [8 – 11] не было дано теоретического обоснования полученных эффектов.

Цели и задачи исследований. Целью исследований является попытка теоретического объяснения повышения эффективности рабочего процесса и снижения теплонапряжённости при частичной теплоизоляции КС, совершенствование математической модели описания нестационарной теплопроводности в поверхностном слое поршня ДВЗ. Поставлена задача: выполнить расчет высокочастотных колебаний температуры на поверхности теплоизолированного поршня, провести анализ изменения амплитуды температурной волны в головке поршня для разных толщин теплоизолирующего слоя.

Способы решения проблемы. Многочисленные экспериментальные данные по применению керамической теплоизоляции на поршнях тепловозного, тракторных и комбайновых дизелей, автомобильных, картинговых, спортивных и авиационных бензиновых двигателях позволяют утверждать, что гальваноплазменная обработка поршней с оптимальными параметрами теплоизолирующего керамического слоя оказывает влияние на физико-химические процессы, которые протекают в КС, позволяет улучшить экономические и экологические показатели двигателей внутреннего сгорания и обеспечивает высокий уровень надежности и ресурса ЦПГ. Для оценки влияния керамического корундового слоя на экономические показатели необходимы новые теоретические представления для описания этих процессов и соответствующие

математические модели. Одна из этих моделей должна учитывать влияние гальваноплазменной обработки поршня на показатели рабочего процесса, которая позволит определить новые уровни индикаторных и эффективных показателей дизеля.

Обоснование научных и практических результатов

Современные математические модели и методики расчета рабочего процесса дизелей предусматривают учет среднецикловой температуры T_W поверхности камеры сгорания. При проведении экспериментальных исследований влияния теплоизолирующих покрытий поршней на показатели рабочего процесса, в основном, также учитывают среднецикловую температуру огневой поверхности. В работах Я.Б. Зельдовича [12] показано, что воспламенение вблизи нагретой поверхности происходит в момент, когда её температура становится выше критической. Критическая температура фазового перехода жидкого топлива в парообразное состояние $T_{кр}$ составляет 350–400 °С. Когда температура поверхности КС значительно превышает эту температуру, резко интенсифицируется процесс испарения топлива. Скорость диффузии паров топлива и кислорода вблизи стенок отстаёт от скорости испарения паров топлива, создаются переобогащённые топливом зоны. Это приводит к снижению максимальной скорости тепловыделения и увеличению расхода топлива.

По нашему мнению, нужно учитывать максимальную температуру огневой поверхности поршня в цикле. Переменный процесс подвода тепла к деталям камеры сгорания в процессе цикла работы дизеля приводит к нестационарному тепловому режиму деталей КС, который характеризуется комплексом характеристик: величинами полного колебания температуры за цикл; максимальной и минимальной температурой поверхности детали; асимметрией температурного высокочастотного колебания; глубиной проникновения температурной волны в тело детали КС; скоростью изменения температуры поверхности КС в цикле; фазовым сдвигом температурной волны по отношению к мгновенной температуре рабочего тела в цилиндре двигателя.

В процессе организации сгорания топлива в цилиндре дизеля происходит сложный процесс теплообмена, с переменным температурным полем на поверхности деталей камеры сгорания. Чтобы установить влияние мгновенного температурного поля на процесс сгорания топлива в цилиндре была решена задача связи между толщиной низкотеплопроводного поверхностного слоя поршня δ и изменением температурного состояния его поверхности во времени τ , $T(\delta, x, \tau)|_{x=0}$, в условиях высокочастотного циклического периодического теплового нагружения. С учетом общепринятых в ДВС допуще-

ний исследовано одномерное температурное состояние неограниченной пластины толщиной h , на поверхности которой находится теплоизолирующий слой малой толщины δ (рис. 1).

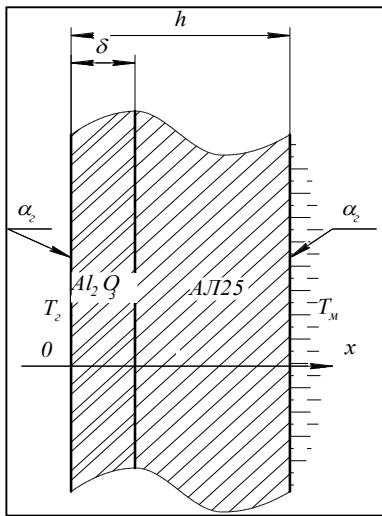


Рис. 1. Схема взаимодействия двухслойной стенки с рабочим телом и охлаждающим маслом

Задача решалась методом численного моделирования в формулировке вида

$$\rho(x)c(x, T(x, \tau)) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \lambda(x, T(x, \tau)) \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2}$$

с граничными условиями третьего рода,

$$\lambda(0, T(0, \tau)) \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} + \alpha_T(\tau) [T_T(\tau) - T(0, \tau)] = 0,$$

$$\alpha_M [T_M - T(l, \tau)] - \lambda(l, T(l, \tau)) \frac{\partial T(l, \tau)}{\partial x} = 0$$

применительно к поршню из сплава АЛ25 дизеля 6ЧН13/11,5. Общая толщина исследуемой двухслойной стенки $h = 16,3$ мм. Толщина поверхностного низкотеплопроводного слоя δ со стороны КС варьировалась в пределах от 0 до 5 мм. Теплофизические характеристики для сплава АЛ25 задавались соотношениями:

$$\lambda = 137,828 - 1,240 \cdot 10^{-2} (T - 273) + 1,285 \cdot 10^{-4} (T - 273)^2, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К});$$

$$c = 815,790 + 0,143(T - 273) + 7,804 \cdot 10^{-4} (T - 273)^2, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$\rho = 2720 \text{ кг}/\text{м}^3,$$

для слоя – $\lambda = 2,85 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}), c = 837 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}),$

$$\rho = 3200 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Решение задачи реализовано на основе использования разностного уравнения явной схемы. В работах [13, 14] нами выполнено предварительное исследование при шаге по координате $\Delta x = 0,1$ мм. Полученные результаты стали основанием проведения представленной работы. Комплекс последующих исследований зависимости полученных результатов от принятого шага по координате Δx показал необходимость уменьшения последнего до 0,01 мм.

Шаг по времени $\Delta \tau = \min(\rho c / 6\lambda) \cdot 10^{-8}$ определялся из условия устойчивости решения при обеспечении погрешности его аппроксимации $\Pi = O(\Delta x^2 + \Delta \tau^2)$. Результаты расчетов при $N_e = 130$ кВт и $n = 2100$ мин⁻¹ приведены на рис. 2.

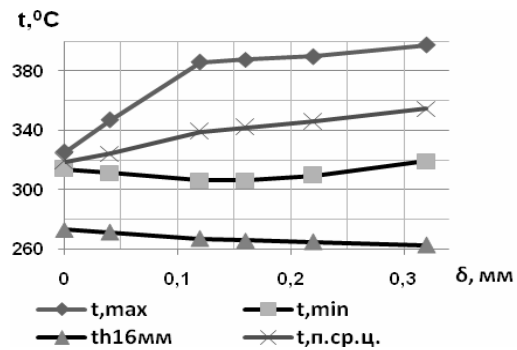


Рис. 2. Температура поверхности поршня в зависимости от толщины теплозащитного слоя: t, min – минимальная мгновенная температура цикла; t, max – максимальная мгновенная температура цикла; $t, h=16\text{мм}$ – температура внутри днища; $t, \text{п.ср.ц.}$ – температура поверхности среднецикловая

Видно, что при толщинах корундового слоя 0,12 – 0,15 мм уменьшается рост максимальной мгновенной температуры цикла и прекращается снижение минимальной. Поэтому, на наш взгляд, эти значения толщины слоя в первом приближении можно считать рациональными. Задача определения изменения температурного состояния в поверхностном слое поршня на глубине x в зависимости от угла поворота коленчатого вала φ и толщины теплоизолирующего слоя δ , $T(\delta, x, \varphi)|_{0 \leq x \leq \delta; x > \delta}$, решалась в условиях высокочастотной циклической тепловой нагрузки поверхности КС на стационарном режиме работы двигателя с граничными условиями третьего рода $\alpha = f_1(\varphi)$, $T_\infty = f_2(\varphi)$, принятыми раньше.

Результаты расчетов для поршня без низкотеплопроводного слоя позволили установить, что на поверхности материала происходит колебание температуры на протяжении цикла работы дизеля, которое равняется 11,8К (рис. 3). При этом минимальное значение температуры 312,75 °C отвечает 290, а максимальное 325,6 °C – 390 гр. п.к.в. Снижение и рост температуры относительно среднециклового значения соответственно равны –6,3К и 6,5К.

Мгновенное значение температуры поверхности совпадает с среднецикловым ее значением в 354 и 525 гр.п.к.в. В окрестности точки $\varphi = 390$ гр.п.к.в., где температура поверхности максимальна, на глубине $h=0,4$ мм мгновенное значение температуры практически совпадает со среднецикловым ($\Delta t \approx 0$ К), а на глубине $x=1,1$ мм уже имеем максимальное снижение температуры. Амплитуда высокочастот-

ного колебания температуры быстро уменьшается с глубиной. Колебание практически имеет место до величины $h < 3$ мм. Эти данные достаточно близки к результатам исследований [15].

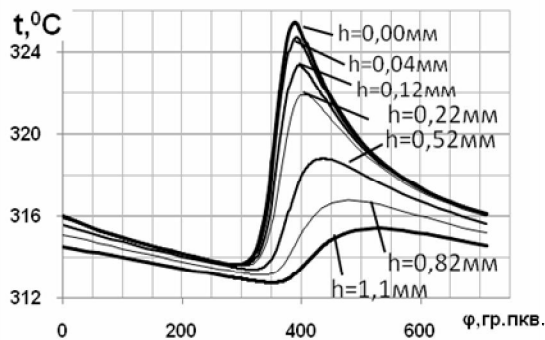


Рис. 3. Расчетные значения колебаний температуры на поверхности и в теле поршня

При использовании на поверхности КЗ низкопроводного тонкого керамического слоя происходит рост величины полного колебания температуры поверхности поршня при росте максимальной температуры от 325,5 до 386 °С и уменьшении минимальной температуры от 313,5 до 306 °С; увеличение размаха температурной волны с 11,8К до 80К; уменьшение глубины проникновения температурной волны в тело поршня с 2,2 мм до 1,2 мм; увеличение скорости изменения температуры поверхности детали; уменьшение фазового сдвига температурной волны по отношению к мгновенной температуре рабочего тела в цилиндре двигателя (рис. 4).

Из рис. 3, 4 видно, что от 0 до 300 гр.п.к.в и от 600 до 720 гр.п.к.в температура на поверхности и в глубине поршня на 6 – 8 К ниже, чем у поршня без теплоизоляции. На глубине 0,12 мм от поверхности, где заканчивается корундовый слой, при $\varphi=380$ гр.п.к.в температура ниже на 13,64 К. Превышение максимальной температуры поверхности с керамическим слоем против поршня без теплоизоляции составило 60К при $\varphi=388$ гр.п.к.в.

Выводы из данного исследования

Выполненные расчёты хорошо согласуются с экспериментальными данными других исследователей. Влияние теплоизоляции на к.п.д. цикла дизельного двигателя незначительно, если температура стенки будет постоянна, и её температура будет гораздо выше, чем без теплоизоляции.

Установлена связь между толщиной низкопроводного поверхностного слоя поршня δ и изменением температурного состояния. Применение теплоизоляции позволяет при существенном росте максимальной мгновенной температуры поверхности получить эффект снижения минимальной мгновенной температуры. Рост амплитуды температур-

ной волны на поверхности теплоизоляционного слоя оказывает слабое влияние на амплитуду колебания температуры в основном металле.

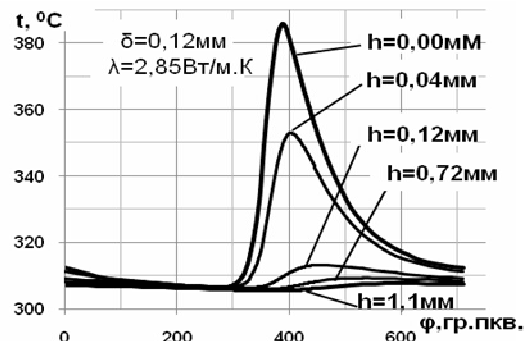


Рис. 4. Колебание температурной волны в корундовом слое

Применение теплоизоляции позволяет снизить температуру тела поршня под слоем и способствует увеличению ресурса поршня.

Литература

1. Kamo R. *Cycles and performance studies for advanced diesel engines. Conference on Ceramics for High Performance Applications / R. Kamo. – Newport, RI, Mar. 1977.*
2. Kamo R. *Adiabatic turbocompound engine performance prediction / R. Kamo, W. Bryzik // SAE Condress, Detroit, 1978, Paper 780068.*
3. Valland H. *A theoretical analysis of thermal barriers in diesel engine cylinders / H. Valland, G.K. Wyspianski // Norwegian Marine Research. – 1982. – 10, No. 2,34.*
4. Wallace F.J. *Thermal barrier pistons and their effect on the performance of compound diesel engine cycles / F.J. Wallace, T.K. Kao, W.A. Alexander, A.C. Cole, M. Tarabad // SAE, Detroit, Mar. 1983, Paper 830312.*
5. Wallace F. *Thermally insulated Diesel Engines / F. Wallace, T.K. Kao and oth. // Proc. Instn. Merh. Engrs. – Vol.1984 A. – No. 5.*
6. Woschni Gerhard. *Heat insulation of combustion chamber walls-a measure to decrease the fuel consumption of I.C. engines? / Gerhard Woschni, Walter Spindler, Konrad Kolesa // SAE Techn. Pap. Ser., 1987. – No. 870339. – 11 p.*
7. Woschni Gerhard. *Experimental investigation of the heat transfer in internal combustion engines with insulated combustion chamber walls. Heat and mass transfer in gasoline and diesel engines / Gerhard Woschni. – England, 1987. – 13 p.*
8. Костин А.К. *Теплонапряжённость двигателей внутреннего сгорания / А.К. Костин, В.В. Ларионов, Л.И. Михайлов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 222 с.*
9. Коллегов Е.В. *Поршни дизеля ОД100 с керамическими покрытиями / Е.В. Коллегов // Вестник ВНИИ железн транспорта. – 1965. – № 1. – С. 44-51.*
10. Никитин М.Д. *Теплозащитные и износи-*

стойкие покрытия деталей дизелей / М.Д. Никитин, А.Я. Кулик, Н.И. Захаров. – Л.: Машиностроение, 1977. – 165 с.

11. Чепиль В.С. Исследование влияния термоизолирующего покрытия доньщика камеры сгорания в поршне на параметры рабочего процесса и тепловое состояние двигателя Д20 / В.С. Чепиль, Я.И. Гордиенко // Двигатели внутреннего сгорания. – Х.: Изд-во ХГУ, 1970. – Вып. 10. – С. 46-52.

12. Зельдович Я.Б. Теория зажигания накаливаемой поверхностью / Я.Б. Зельдович // ЖТЭФ. – 1938. – Т.9, Вып. 12. – С. 1530-1536.

13. Эффект влияния малых толщин теплозащитного покрытия поршня на его мгновенную поверхностную температуру / А.П. Марченко,

В.А. Пылев, В.В. Шпаковский, В.В.Пылев // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей // Матер. XI Междунар. НПК. – Владимир: ВГУ, 2008. – С. 220-224.

14. Аналіз високочастотних коливань температури в поверхневому шарі поршня з теплоізолюючим покриттям / А.П. Марченко, В.О. Пильов, В.В. Шпаковський, В.В.Пильов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2008. – № 1. – С. 65-71.

15. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности / Ф.И. Абрамчук, А.П. Марченко, Н.Ф. Разлейцев и др.; под общ. ред. А.Ф. Шеховцова. – К.: Техника, 1992. – 272 с.

Поступила в редакцию 1.06.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. двигателей внутреннего сгорания Ф.И. Абрамчук, Харьковский национальный автомобильный университет, Харьков.

РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ ПОВЕРХНІ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ПОРШНЯ З КЕРАМІЧНИМ ПОВЕРХНЕВИМ ШАРОМ

В.В. Шпаковський, А.П. Марченко, В.В. Пильов

У роботі приводиться теоретичне обґрунтування підвищення ефективності роботи й ресурсу двигуна при частковій теплоізоляції камери згоряння, удосконалювання математичної моделі опису нестационарної теплопровідності в поверхневому шарі поршня двигуна внутрішнього згоряння. Наведено результати розрахунків високочастотних коливань температури на поверхні керамічного шару поршня й зміни амплітуди температурної хвилі в тілі головки поршня для різних товщин керамічного шару. Отримані результати досить близькі до результатів досліджень інших авторів. При використанні на поверхні камери згоряння н тонкого керамічного шару відбувається ріст величини повного коливання температури поверхні поршня при рості максимальної й зменшенні мінімальної температури; зменшення глибини проникнення температурної хвилі в тіло поршня; збільшення швидкості зміни температури поверхні поршня; зменшення фазового зрушення температурної хвилі стосовно миттєвої температури робочого тіла в циліндрі двигуна.

Ключові слова: двигун, поршень, керамічний шар, теплоізоляція, амплітуда, температурна хвиля, глибина проникнення.

RESULTS OF MATHEMATICAL MODELLING OF THE TEMPERATURE CONDITION OF THE SURFACE OF THE COMBUSTION CHAMBER OF THE BUCKET WITH CERAMIC SUPERFICIAL LAYER

V.V. Shpakovsky, A.P. Marchenko, V.V. Pylyov

In work the theoretical substantiation of increase of an overall performance and a resource of the engine is resulted at a partial heat insulation of a combustion chamber, perfection of mathematical model of the description of non-stationary heat conductivity in a superficial layer of the bucket of the engine of internal combustion. Results of calculations of high-frequency fluctuations of temperature on a surface of a ceramic layer of the bucket and change of amplitude of a temperature wave in a body of a piston crown for different thickness of a ceramic layer are resulted. The received results are close enough to results of probes of other authors. At use on a surface of a combustion chamber of a thin ceramic layer there is a growth of size of full fluctuation of temperature of a surface of the bucket at growth maximal and reduction of the minimal temperature; reduction of depth of penetration of a temperature wave in a body of the bucket; increase in speed of change of temperature of a surface of the bucket; Reduction of phase shift of a temperature wave in relation to instant temperature of a working body in the cylinder of the engine.

Key words: the engine, the bucket, a ceramic layer, a heat insulation, amplitude, a temperature wave, depth of penetration.

Шпаковский Владимир Васильевич – канд. техн. наук, доцент, ст. научн. мотр. кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Национальный технический университет «ХПИ», e-mail: Shpak70@rambler.ru.

Марченко Андрей Петрович – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания», Национальный технический университет «ХПИ».

Пылёв Вячеслав Владимирович – студент кафедры «Двигатели внутреннего сгорания», Национальный технический университет «ХПИ».