

кладанні механічного навантаження / О.В. Триньов, В.Т. Коваленко, А.Т. Тихоненко, О.М. Клименко, Д.А. Куртов // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2010. – №2. – С. 15-20. 3. Курилов А.Г. Направление разработок нового семейства дизельных двигателей ЯМЗ для тяжелой тракторной техники / А.Г. Курилов, В.Р. Гальговский, Ю.Г. Субботин, Ю.В. Попов // Совершенствование мощностных, экономических и экологических показателей ДВС. – Владимир. – 2001. – С. 162-164. 4. Тринев А.В. Влияние локального воздушного охлаждения на температуру клапанной перемычки головки цилиндров форсированных автотракторных дизелей / А.В. Тринев, П.Д. Гончар // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – №1. – С. 63-67. 5. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: «Энергия», 1977. – 344 с.

bezmotornogo stenda / A.V. Trinev, A.N. Avramenko, S.V. Oboznyi, V.I. Vahrushev // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – Har'kov: NTU «HPI». – 2007. – №1. – С. 31-37. 2. Trin'ov O.V. Analiz napruženogo stanu vipusknih klapaniv shvidkohidnogo dizelja pri prikkladanni mehanichnogo navantazhenja / O.V. Trin'ov, V.T. Kovalenko, A.T. Tihonenko, O.M. Klivenko, D.A. Kurtov // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – Har'kov: NTU «HPI». – 2010. – №2. – С. 15-20. 3. Kurilov A.G. Napravlenija razrobotok novogo semejstva dizel'nyh dvigatelej JaMZ dlja tjazhelej traktornoj tehnik / A.G. Kurilov, V.R. Gal'govskij, Ju.G. Subbotin, Ju.V. Popov // Sovershenstvovanie mownostnyh, jekonomicheskij i jekologicheskij pokazatelej DVS. – Vladimir. – 2001. – С. 162-164. 4. Trinev A.V. Vlijanie lokal'nogo vozdušnogo ohlazhdenija na temperaturu klapannoj peremychki golovki cilindrov forsirovannyh avtotraktornyh dizelej / A.V. Trinev, P.D. Gonchar // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – Har'kov: NTU «HPI». – 2005. – №1. – С. 63-67. 5. Miheev M.A. Osnovy teploperedachi / M.A. Miheev, I.M. Miheeva. – M.: «Jenergija», 1977. – 344 s.

#### **Bibliography (transliterated):**

1. Trinev A.V. Issledovanie uslovij lokal'nogo vozdušnogo ohlazhdenija ognevoغو dniwa golovki cilindrov s ispol'zovaniem

УДК 621.43.016.4

**А.П. Марченко, д-р техн. наук, В.В. Шпаковский, д-р техн. наук**

## **ВЛИЯНИЕ КОРУНДОВОГО СЛОЯ НА РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПОРШНЕЙ НА ПРОЦЕСС СГОРАНИЯ В ДВС**

### **Постановка проблемы и связь с научными и практическими задачами**

При испытаниях ДВС отмечалось [1], что при использовании поршней с керамическим покрытием днища поршня «изменения рабочего процесса бывают чрезмерно велики, по сравнению с незначительным повышением температуры поверхности» днища поршня. Исследования влияния керамических покрытий деталей камеры сгорания, выполненные на ряде двигателей [2], показали, что повышение мощности двигателя трудно объяснить только снижением потерь тепла. Некоторые учёные объясняют это каталитическим воздействием керамического покрытия на параметры рабочего цикла двигателя [3]. Однако единого мнения о влиянии керамических покрытий на процесс сгорания, повышение мощности и снижение удельного расхода топлива пока не сложилось.

### **Цель исследований**

Целью данного исследования является установление факта повышения эффективной мощности ДВС при использовании поршней с теплоизолирующим корундовым слоем и выяснение причин повышения эффективности их работы с помощью исследования процессов, происходящих в камерах сгорания (КС) со снятием индикаторных диаграмм,

определением скорости тепловыделения, скорости нарастания давления и температуры газа.

### **Способы решения проблемы**

Для решения проблемы были проанализированы результаты испытаний ДВС с теплоизолирующими покрытиями, выполненные другими исследователями. На кафедре ДВС НТУ «ХПИ» проведены сравнительные испытания на моторном стенде со снятием индикаторных диаграмм тракторного дизеля с серийными и с поршнями с корундовым слоем на доньшках и цилиндрических частях поршней, и тепловозных дизелей при реостатных испытаниях.

### **Анализ публикаций**

Экспериментальные исследования [2] на дизелях, оснащенных поршнями с керамическим покрытием толщиной 0,2 – 0,9 мм продемонстрировали снижение эффективного расхода топлива на 6–8 г/(кВт·час) за счёт уменьшения потерь теплоты и более полного сгорания. Так, для дизеля 1Ч 18/22 снижение  $g_e$  составило 7–9 г/(кВт·час) [2]. На дизеле 1ЧН18/20 с покрытием алюминиевого поршня окисью алюминия толщиной  $(0,25-0,3) \cdot 10^{-3}$  м при оптимальном угле  $\varphi_{оп}=14 - 14,5^\circ$  на номинальном режиме эффективный расход топлива снизился на 2,7 г/(кВт·час) [2], на дизеле 2ЧН21/21 при  $n=1200$  мин<sup>-1</sup> и  $\varphi_{оп}=36-38^\circ$  снижение  $g_e$  составило 5,44 г/(кВт·час) [2]. Покрытие из окиси алюминия тол-

щиной  $(0,2 - 0,25) \cdot 10^{-3}$  м на поршне судового низкооборотного дизеля 1Ч 24/36 с объёмным смесеобразованием вызвало снижение эффективного расхода топлива на нагрузках менее  $45\%N_e$  на  $2,5-13$  г/(кВт·час) [2].

При использовании оксидных керамических покрытий, полученных методом АМДО, на поршне и головке цилиндра, толщиной около 0,06 мм для тепловой защиты рабочих поверхностей доньшка поршня и головки цилиндра двухтактного ДВС уменьшился теплоотвод, на 6% увеличилась максимальная мощность двигателя и на 3,2% снизился удельный расход топлива [4].

Оснащение дизеля Д-240Л поршнями с корундовым слоем обусловило снижение удельного расхода топлива на 6,6%, увеличение максимальной мощности на 8,66%. Серийный двигатель развивал мощность 55,16 кВт, а с поршнями с корундовым слоем – 59,94 кВт.

В результате стендовых испытаний дизеля Д65НТ1, оснащенного поршнями с корундовым слоем и тефлоновым покрытием поверхностей трения, установлено снижение расхода топлива на 5,1%, увеличение развиваемой мощности с 44,72 кВт до 46,7 кВт, т.е. на 4,4%, что было обусловлено снижением суммарных тепловых и механических потерь на внутреннее трение. Произошло уменьшение дымности выхлопных газов с 46 до 30%.

Известно, что потери на трение в цилиндропоршневой группе (ЦПГ) составляют порядка 50-70 % от общих механических потерь двигателя. В основном это потери от трения между цилиндром и поршнем, цилиндром и поршневыми кольцами. Исследованиями [4] установлено, что при использовании гильз из алюминиевого сплава Д-16 с керамической рабочей поверхностью мощность механических потерь на 7-10% меньше по сравнению с серийными гильзами.

В результате испытаний двигателя МеМз-245 так же было установлено, что применение поршней с корундовым поверхностным слоем толщиной 0,15 – 0,2 мм на доньшке поршня и кольцевом поясе позволяет снизить расход топлива во всём диапазоне скоростной характеристики от 1,7% до 10% и значительно снизить содержание углеводородов в отработанных газах [5].

#### Обоснование научных и практических результатов

Для экспериментальных исследований был выбран дизель 4ЧН 12/14. Исследования проводи-

лись на моторном стенде со снятием индикаторных диаграмм. Сначала с серийными поршнями, а затем с поршнями с корундовым поверхностным слоем.

Известно, что для получения наивыгоднейших термодинамических показателей рабочий цикл двигателя должен быть чисто адиабатным, т.е. температура стенок КС должна изменяться вслед за изменением температуры газа на протяжении всего цикла [6,7]. Однако это идеальный случай и достичь его пока не представляется возможным. Теплоизоляция огневой поверхности поршня корундовым слоем рациональной толщины  $\delta \approx (0,12-0,16) \cdot 10^{-3}$  м, позволила получить колебания температуры теплоизолированной поверхности поршня в пределах  $60-80^\circ\text{C}$  вслед за изменением температуры газа [8]. Но и такие изменения температуры поверхности позволяют направить тепловой поток от газа к стенке или от стенки к газу в зависимости от мгновенной температуры газа, который может быть выше или ниже температуры поверхности поршня. Рациональная толщина теплоизолирующего слоя обеспечивает снижение максимального значения удельного теплового потока в поршень на 16% по сравнению с поршнем без теплоизоляции, что приводит к снижению потерь тепла (рис.1). Величина максимального удельного теплового потока снижается с  $3724$  кВт/м<sup>2</sup> до  $3135$  кВт/м<sup>2</sup>.

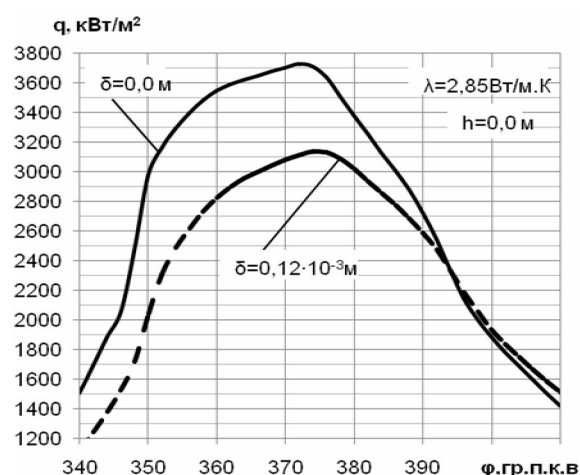


Рис. 1. Максимальные значения тепловых потоков в поршень без теплоизоляции доньшка и при толщине теплоизоляции  $\delta = 0,12 \cdot 10^{-3}$  м

В процессе наполнения температура поверхности корундового слоя поршня снизилась на  $8^\circ\text{C}$  по сравнению с температурой серийного поршня, максимальное значения размаха температурной волны увеличилось на  $60^\circ\text{C}$ . При снятии нагрузочных характеристик и работе двигателя с поршнями

с корундовым слоем максимальное давление цикла увеличилось на 0,5 МПа [8]. Процесс самовоспламенения начался раньше, при меньшем количестве впрыснутого топлива и поэтому при первой вспышке максимальное значение скорости тепловыделения уменьшилось на 12,5%. Это обусловило мягкую работу двигателя. Максимальное значение скорости тепловыделения в камере сгорания с поршнем с корундовым слоем во время второй вспышки составило 0,042 1/град. при  $\phi = 367$  гр. п. к. в., а с серийным поршнем – 0,038 1/град. при  $\phi = 368$  гр. п. к. в., т.е. больше на 8,35%. Сопоставляя скорости тепловыделения при работе дизеля с серийными и поршнями с корундовым слоем видно, что скорость тепловыделения в камере сгорания с поршнями с корундовым слоем существенным образом ниже в области первого максимума и значительно выше в области второго максимума [8]. Увеличение максимального значения скорости сгорания в области второго максимума на 0,0032 1/град. и приближение его к ВМТ на 1,1 гр.п.к. в. улучшило эффективность использования теплоты сгорания, что привело к повышению эффективной мощности дизеля. Так же следует отметить более раннее (на 10-20 гр. п. к. в.) окончание сгорания. Оно особенно заметно на номинальном режиме работы двигателя.

При работе с поршнями с корундовым слоем у автотракторного дизеля 4ЧН 12/14 снижение механических потерь составило более 60% от суммарных механических потерь, а при работе с  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup> и  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup> удельный эффективный расход топлива уменьшился во всем диапазоне исследованных нагрузок на 3...4 г/(кВт·час). При частоте вращения коленчатого вала  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup> удельный эффективный расход топлива уменьшился при максимальных нагрузках на 2 г/(кВт·час) [9]. Массовый выброс твердых частиц с отработавшими газами дизеля снизился на 19 – 30% [10].

Для проведения эксплуатационных испытаний были подобраны 2 маневровых тепловоза ЧМЕ-3 одного месяца и года выпуска, работающие в условиях депо Харьков-Сортировочный. В дизель одного тепловоза были установлены новые серийные цилиндропоршневые группы, а в дизель второго тепловоза установлены серийные гильзы и новые поршни с корундовым слоем. При опытной эксплуатации тепловоза ЧМЕ-3 №6830 с поршнями

с корундовым слоем реостатные испытания проводились в 1993, 1994, 1997, 1999, 2002, 2005, 2008 годах без замены цилиндропоршневой группы. Реостатные испытания тепловоза ЧМЕ-3 №6835 с серийными поршнями проводились в 1992, 1994, 1995, 1999, 2002, 2005, 2008 г. При этом 3 раза была произведена замена цилиндропоршневых групп. Запись параметров осуществлялась на каждой позиции ручки контроллера, начиная со второй позиции. Испытания проводились на протяжении 16 лет специалистами депо Харьков-Сортировочный с участием научных сотрудников УкрГАЗТ и НТУ «ХПИ». В таблице 1 и на рис.2 [11] приведены результаты реостатных испытаний дизелей №6830 и №6835 после ТР-3 с новыми поршнями и тепловоза с поршнями с корундовым слоем после длительной эксплуатации.

Таблица 1. Реостатная мощность дизелей тепловозов ЧМЕ-3 после проведения ТР-3

n, мин <sup>-1</sup>	Тепловоз № 6830		Тепловоз №6835
	Новая ЦПГ 20.02.1993	Наработка 114676 моточасов 17.01.2009	Новая ЦПГ 05.11.2008
	N <sub>к,1993</sub> кВт	N <sub>к,2008</sub> кВт	N <sub>с</sub> , кВт
280			9,59
290		29,55	
330		77,18	
340	12		
350			48,67
360	90		
410		255,84	
420			186,114
440	360		
460			298,45
475	576		
480		436,9	
550		564	
555	760		
560			441,25
610			566,25
620		737,84	
630	874		
680			633
690		747	
730		742	
750	1040		

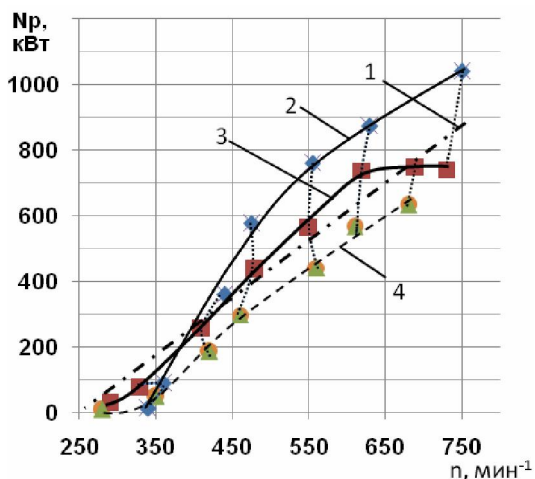


Рис.2. Тепловозные характеристики тепловозов ЧМЭ-3 №6830 и №6835 после ТР-3:

1 – по ЦТ-0042; 2 – ЧМЭ-3 №6830, 03. 1993г.(новая ЦПГ); 3 – ЧМЭ-3 №6830, 12.2008г.; (наработка 114676 моточасов); 4 – ЧМЭ-3 № 6835, 09.2008г. (новая ЦПГ)

В результате испытаний установлено, что реостатная мощность дизеля тепловоза ЧМЭ-3 №6830 с новыми поршнями с корундовым слоем значительно превышает реостатную мощность дизеля тепловоза №6835 с новыми серийными поршнями (рис.3).

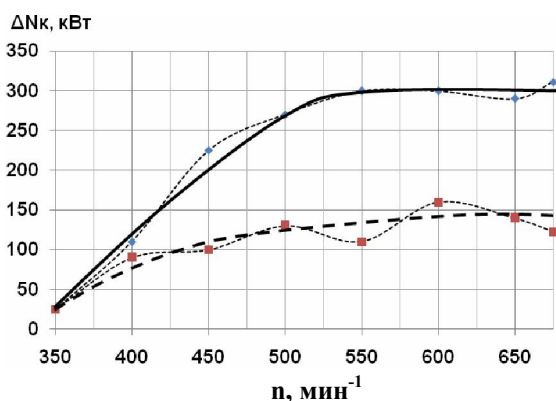


Рис.3. Превышение реостатной мощности дизеля тепловоза ЧМЭ-3 с поршнями с корундовым слоем над реостатной мощностью серийного дизеля

$$\Delta N_{к,1993} = N_{к,1993} - N_c; \quad \Delta N_{к,2008} = N_{к,2008} - N_c$$

—  $\Delta N_{к,1993}$ ; - - -  $\Delta N_{к,2008}$ .

После длительной эксплуатации дизеля с поршнями с корундовым слоем (~ 114676 моточасов) превышение мощности уменьшилось (рис.4), но всё-же реостатная мощность дизеля с поршнями с корундовым слоем на 20 - 40% выше реостатной мощности дизеля с серийными поршнями.

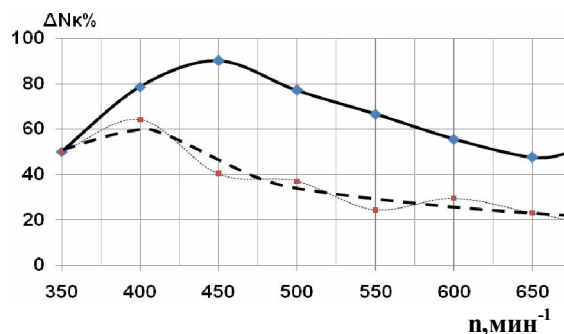


Рис.4. Процент превышения реостатной мощности дизеля тепловоза с новыми поршнями с корундовым слоем над реостатной мощностью тепловоза с серийными поршнями:

$\Delta N_{к,1993} \%$  - с новыми поршнями с корундовым слоем;  $\Delta N_{к,2008} \%$  - после наработки 114676 моточасов  
—  $\Delta N_{к,1993} \%$  . - - -  $\Delta N_{к,2008} \%$ .

Таким образом, утверждение о повышении эффективности ДВС (увеличение мощности и снижение расхода топлива) при работе с поршнями с теплоизолирующим корундовым слоем  $Al_2O_3$ , подтверждено экспериментально.

Улучшение процесса сгорания можно объяснить следующим образом. Корундовый слой на огневой поверхности поршня, образованный с помощью гальваноплазменной обработки, являясь корундоэлектретом с отрицательным поверхностным зарядом  $-3,9 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2$  [12], способствует ускорению процесса сгорания. При впрыске топлива в электрическом поле корундоэлектрета происходит электростатическое распыливание, что приводит к более раннему началу распада топливных молекул с образованием свободных радикалов. Ускоряется появление холодного пламени, сокращается время начала процесса цепного самоускорения реакции, улучшается динамика выделения тепла. За счёт частично-динамической теплоизоляции КС в период диффузионного сгорания происходит повышение температуры газа. Максимальное значение температуры газа в двигателе с поршнем с корундовым слоем увеличивается и сдвигается в сторону ВМТ, что приводит к более быстрому и более полному сгоранию топлива. В период диффузионного сгорания температура газа в КС увеличивается примерно на 30 К [8], а на корундовой поверхности поршня примерно на 60 К, что позволяет получить плазму с повышенной концентрацией ионизирующего воздействия. Избыточный заряд газа в основном положительный, а избыточный заряд корундоэлектрета отрицательный. Притяжение молекул газа к корундовой поверхности усиливается, их скорость многократно увеличивается, что приводит к усилению удара молекул о корундовую

поверхность и разрушению самой молекулы. Происходит разрушение крупных молекул на мелкие фрагменты. Уменьшается энергия активации начала цепной реакции распада молекул. Это и вызывает повышение эффективности работы ДВС. Мощность двигателя возрастает и соответственно уменьшается расход топлива.

Постепенное снижение повышенной реостатной мощности в процессе эксплуатации объясняется уменьшением влияния корундового слоя на процесс сгорания.

#### **Выводы и перспективы разработок**

Повышение мощности ДВС при использовании поршней с корундовым слоем более чем на 20% можно объяснить:

- снижением потерь тепла в КС;
- улучшением динамики выделения тепла за счёт частично-динамической теплоизоляции КС;
- эффектом электростатного воздействия на процесс сгорания топлива в КС;
- уменьшением механических потерь от снижения коэффициента трения корундовой поверхности поршня о гильзу.

Постепенное снижение повышенной реостатной мощности дизеля тепловоза с поршнями с корундовым слоем в процессе длительной эксплуатации можно объяснить уменьшением влияния корундового слоя на процесс сгорания.

В дальнейшем намечается исследовать влияние технологических режимов образования корундового слоя и величины площади корундовой поверхности, расположенной в КС двигателя, на повышение мощности, а так же изучить уменьшение каталитического эффекта при эксплуатации двигателей с поршнями с корундовым слоем.

#### **Список литературы:**

1. Костин А.К. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания / А.К. Костин, В.В. Ларионов, Л.И. Михайлов – Л.: Машиностроение. 1978. – 119 с. 2. Никитин М.Д. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизелей / М.Д. Никитин, А.Я. Кулик, Н.И. Захаров – Л.: Машиностроение. 1977. – 165с. 3. Фомин В.М. Системы химического воздействия на параметры рабочего цикла дизеля / В.М. Фомин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2004. – №6. – С. 10–12. 4. Чигиринова Н.М. Оксидные керамические покрытия - эффективная тепловая защита рабочих поверхностей деталей ЦПГ / Н.М. Чигиринова, В.В. Чигиринов, В.Е. Чигиринов // Автомобильная промышленность. – 2004. – №6. – С. 30–34. 5. Шпаковский В.В., Линьков О.Ю. Анализ эффективности применения поршней с корундовым слоем для снижения расхода топлива / В.В. Шпаковский, О.Ю. Линьков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – №10 (57.) – С. 140–144. 6. Valland H. A. Teoretikal analysis of thermal barriers in diesel engine cylinders / H. A. Valland, G.K. Wyspianski // Norwegian Marine

Reasearh. – 1982. – 10, NO. 2,34. 7. Walase F.J. Thermal barrier pistons and their effect on the performance of compound diesel engine cycles / Walase F.J., Kao T.K., Alekxander W.A., Cole A.C. and Tarabad M. – Detroit.: SAE, Mar. 1983. – Paper 830312. 8. Марченко А.П. Экспериментальные исследования рабочего процесса в камере сгорания ДВС с теплоизолированным поршнем / А.П. Марченко, В.В. Шпаковский // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – №2. – С. 49–53. 9. Парсаданов И.В. Влияние гальвано-плазменной обработки поверхности поршня на механические потери в автотракторном дизеле / И.В. Парсаданов, В.В. Шпаковский, И.Н. Карягин, С.Ю. Белик // Вестник НТУ «ХПИ»: Сб. научн. трудов. Тем. вып. «Транспортное машиностроение». – 2010. – Вып. 38. – С. 88–91. 10. Парсаданов И.В. Оценка влияния гальвано-плазменного покрытия поршня на выбросы твёрдых частиц с отработавшими газами дизеля / И.В. Парсаданов, А.П. Поливянчук // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – №2. – С. 97–100. 11. Шпаковский В.В. Оснащение дизелей маневровых тепловозов поршнями с корундовым слоем для повышения эффективной мощности после текущего ремонта / В.В. Шпаковский // Сб. научн. трудов. – Х.: УКРГАЖТ. – 2009. – Вып.108. – С. 56–60. 12. Шпаковский В.В. Электреты в двигателях внутреннего сгорания / В.В. Шпаковский, О.Ю. Линьков, В.В. Осейчук // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – №9 (56). – С.125–128.

#### **Bibliography (transliterated):**

1. Kostin A.K. Teplonaprjazhennost' dvigatelej vnutrennego sgoranija / Kostin A.K., Larionov V.V., Mihajlov L.I. – L.: Mashinostroenie. 1978. – 119 s. 2. Nikitin M.D. Teplozashitnye i iznosostojkie pokrytija detalej dizelej / Nikitin M.D., Kulik A.Ja., Zaharov N.I. – L.: Mashinostroenie. 1977. – 165s. 3. Fomin V.M. Sistemy himiche-skogo vozdejstvija na parametry rabocheho cikla dizelja / V.M. Fomin // Traktory i sel'skhozajstvnyye mashiny. – 2004. – №6. – S. 10–12. 4. Chigirinova N.M. Oksidnye keramicheskie pokrytija - jeffektivnaja teplovaja zashita rabo-chih poverhnostej detalej CPG / N.M. Chigirinova, V.V. Chigirinov, V.E Chigirinov // Avtomobil'naja promyshlennost'. – 2004. – №6. – S. 30–34. 5. Shpakovskij V.V., Lin'kov O.Ju. Analiz jeffektivnosti primeneniya poverhnosti sloem dlja snizhenija rashoda topliva / V.V. Shpakovskij, O.Ju. Lin'kov // Aviacionno-kosmicheskaja teh-nika i tehnologija. – 2008. – №10 (57.) – S. 140–144. 6. Valland H. A. Teoretikal analysis of thermal barriers in diesel engine cylinders / H. A. Valland, G.K. Wyspianski // Norwegian Marine Reasearh. – 1982. – 10, NO. 2,34. 7. Walase F.J. Thermal barrier pistons and their effect on the performance of compound diesel engine cycles / Walase F.J., Kao T.K., Alekxander W.A., Cole A.C. and Tarabad M. – Detroit.: SAE, Mar. 1983. – Paper 830312. 8. Marchenko A.P. Jeksperimen-tal'nye issledovanija rabocheho processa v kamere sgoranija DVS s teploizolirovannym porshnem / A.P. Marchenko, V.V. Shpakovskij // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 2010. – №2. – S. 49–53. 9. Parsadanov I.V. Vlijanie gal'vano-plazmennoj obrabotki poverhnosti porshnja na mehanicheskie poteri v aviotraktornom dizele / I.V. Parsadanov, V.V. Shpakovskij, I.N. Karjagin, S.Ju. Belik // Vestnik NTU «HPI»: Sb. nauchn. trudov. Tem. vyp. «Transportnoe ma-shinostroenie». – 2010. – Vyp. 38. – S. 88–91. 10. Parsadanov I.V. Ocenka vlijanija gal'vanoplazmennogo pokrytija porshnja na vybrosy tvjorдых chastic s otrabotavshimi gazami dizelja / I.V. Parsadanov, A.P. Polivyanchuk // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 2009. – №2. – S. 97–100. 11. Shpakovskij V.V. Osnawenie dizelej manevrovых тепловозов porshnjami s korundovym sloem dlja povysheniya jeffektivnoj mownosti после текущего ремонта / V.V. Shpakovskij // Sb. nauchn. Trudov. – H.: UKRGAZhT. – 2009. – Vyp.108. – S. 56–60. 12. Shpakovskij V.V. Jelektrety v dvigateljah vnut-rennego sgoranija / V.V. Shpakovskij, O.Ju. Lin'kov, V.V. Osejchuk // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. – 2008. – №9 (56). – S.125–128.