

ОСОБЛИВОСТІ ТЕМПЕРАТУРНОГО СТАНУ СТІНКИ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ПОРШНЯ З ШАРОМ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ В ЗОНІ НАЯВНОСТІ ПАЛИВНОЇ ПЛІВКИ

У статті приведено результати моделювання нестационарного високочастотного температурного стану теплоізолюваної стінки камери згоряння поршня автотракторного двигуна в зоні наявності на її поверхні паливної плівки. Використано одновимірну математичну модель, яка враховує теплообмін плівки зі стінкою та робочим тілом, перемішування шарів палива та процес його випаровування. Досліджено ефекти частково-динамічної теплоізоляції, що мають місце при цьому, та вплив на них режимних факторів, товщини та початкової температури паливної плівки.

Постановка проблеми

Перспективним засобом комплексного покращення показників двигунів внутрішнього згоряння є утворення на поверхні їх поршнів тонкого низькотеплопровідного шару. Ефекти частково-динамічної теплоізоляції (ЧДТ), які виникають при цьому в зонах відсутності та наявності паливної плівки на стінках камери згоряння, різняться і, навіть, можуть суперечити один одному у впливі на перебіг робочого процесу [1].

Уявлення щодо цих ефектів в зоні відсутності палива вже є достатньо розвинутими [2], а їх вплив на температурний стан стінки [3] та робочий процес [4] піддається моделюванню. Однак сутність процесів в зоні наявності паливної плівки розкрита ще недостатньо.

Аналіз публікацій

У відомих роботах з дослідження робочого процесу чи температурного стану деталей камери згоряння, наприклад [5-7], розгляд нестационарної високочастотної зміни температури стінки під паливною плівкою не виконувався. Це можна вважати виправданим для традиційної конструкції, що не має теплоізоляції на стінці. Проте, у разі введення штучної ЧДТ або виникнення на поверхні поршнів природного нагару, такий підхід стає неприйнятним.

Для оцінки температурного коливання, викликаного ЧДТ, може використовуватись запропонована нами одновимірною математичною моделлю [8, 9]. Вона передбачає урахування наступних процесів: теплообміну між паливною плівкою, робочим тілом та багатошаровою стінкою; дифузію та перемішуванням шарів палива шляхом усереднення температури по товщині плівки; випаровування та перевагу його швидкості над швидкістю дифузії; наявність полум'я в пристінній зоні під час випаровування та викликаного цим ефекту конвекційного сплеску.

Згідно нашим дослідженням, одновимірною моделлю не може бути застосована для визначення те-

мпературного стану поршня через наявність в його тілі теплових потоків між зоною під плівкою та сусідніми з нею. Також визначення впливу ЧДТ на загальну характеристику випаровування неможливе без урахування руху паливної плівки по стінці камери згоряння та відмінності температури і товщини плівки в різних частинах області розтікання палива. Це вимагає підвищення розмірності задачі.

Тим не менш на засадах одновимірної моделі можливий принциповий аналіз явищ ЧДТ та впливу на них ряду врахованих в цій моделі факторів.

Метою роботи є встановлення особливостей нестационарного високочастотного температурного стану стінки камери згоряння з ЧДТ в зоні наявності паливної плівки.

Умови моделювання

Чисельний експеримент реалізовано за математичною моделлю [9]. У якості модельного об'єкту використано дизель 4ЧН12/14. Він має форсунку, зміщену відносно центру камери згоряння, відповідно, паливна плівка від різних струменів має відмінні параметри, що дозволяє розглянути ефекти ЧДТ в ширшому діапазоні умов. Досліджено режими роботи двигуна $N_e = 100$ кВт, $n = 2000$ хв⁻¹ (режим I) та $N_e = 40$ кВт, $n = 1000$ хв⁻¹ (режим II).

Момент утворення плівки φ_w та кількість палива на стінці встановлювались окремо для кожного паливного струменя (рис.1) за результатами моделювання робочого процесу з уточненим описом зносу паливних струменів вихором робочого тіла [10]. Початкова товщина плівки $\delta_{\text{ппо}}$ тут визначалась віднесенням отриманого об'єму палива до площі його розтікання. Отримані параметри плівки наведено в таблиці.

Граничні умови третього роду також визначались за даними робочого процесу. Під час існування паливної плівки температура середовища відповідала температурі робочого тіла в циліндрі, а коефіцієнт тепловіддачі приймався з урахуванням конвекційного сплеску Вошні $\alpha_{nl} = 20000$ Вт/(м²·К).

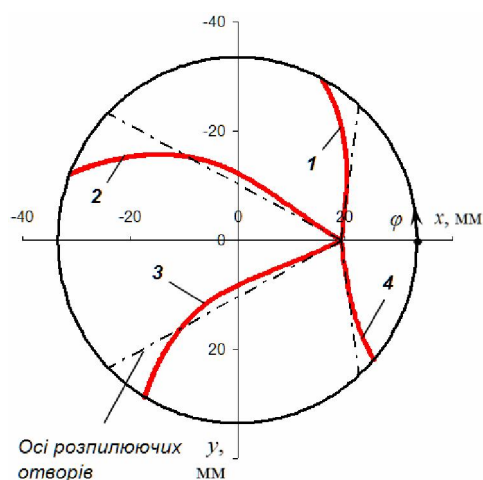


Рис. 1. Трасекторії руху вершин паливних струменів в циліндрі дизеля 4ЧН12/14: 1-4 – номера струменів

Таблиця – Початкові параметри паливної плівки

	Струмінь	$\delta_{пл}$, мм	φ_w , гр. п.к.в.
Режим I	Довгий (3)	0,03	365
	Короткий (4)	0,07	354
Режим II	Довгий (3)	0,08	355,8
	Короткий (4)	0,13	350

Через перевищення тиском робочого тіла у циліндрі цього двигуна критичного тиску складових хімічних речовин палива на протязі усього існування паливної плівки, температуру його випаровування прирівняно до температури фазового переходу палива $T_{кип} = 710$ К [5], а питома теплота пароутворення r при цьому зменшилася до нуля.

Комплекс багатоваріантних розрахунків проводився для плівки, утвореної довгими та короткими паливними струменями, за відсутності ЧДТ, наявності корундового шару товщиною $\delta_n = 0,25$ мм і наявності аналогічного корундового шару разом з нагаром $\delta_n = 0,05$ мм поверх нього. Останній випадок відповідає зоні торкання паливним струменем стінки. Розрахунок виконаний для різних початкових температур палива T_{i0} в момент утворення плівки на стінці.

Результати моделювання

Отриманий характерний вигляд коливання температури поверхні стінки в зоні паливної плівки наведено на рис. 2.

Температура стінки підчас теплообміну з робочим тілом тут зростає до моменту утворення плівки φ_w . Після нього стінка охолоджується, віддаючи теплоту паливу, яке має меншу температуру і значну теплоємність. Охолодження може значно

зменшитись та сповільнитись у разі зближення температур палива і стінки. Це можна побачити на прикладі стінки без теплоізоляції (крива 1). Одночасно відбувається випаровування палива, яке завершується у момент, що відповідає куту повороту колінчастого вала φ_{en} . Цей момент визначається в процесі розрахунку і, як встановлено, істотно не відрізняється для конструкцій поршнів з ЧДТ камери згорання та без неї. Згорання після закінчення випаровування продовжується до кута φ_x .

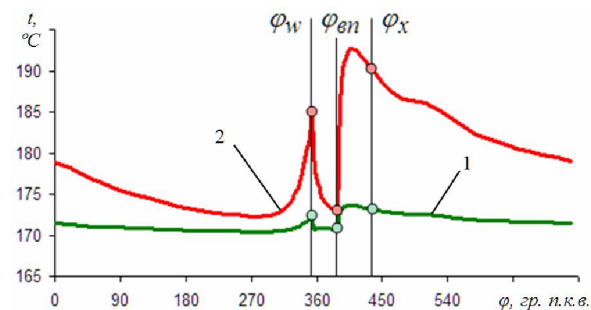


Рис. 2. Характерне коливання температури стінки в зоні паливної плівки: 1 – без ЧДТ, 2 – з ЧДТ

Результати багатоваріантного моделювання приведено на рис. 3. Вони свідчать, що має місце істотне зменшення температури поверхні під плівкою, властиве як конструкції з теплоізоляцією, так і без неї. В одновимірній постановці воно може досягати 140 К (див. рис. 3, а). Останнє є поясненням експериментально зафіксованого виникнення нагару в зоні контакту паливних струменів зі стінкою (див. рис. 1). Особливе значення це має для поршня зі штучною ЧДТ, коли в інших зонах нагар практично відсутній.

Як видно з порівняння температурних коливань при різних значеннях початкової температури T_{i0} саме нею визначається величина різкого охолодження стінки підчас існування плівки. Також істотним є вплив на загальний рівень температури на протязі циклу.

У моделі робочого процесу проф. М. Ф. Разлейцева [5], величина T_{i0} оцінюється як 50-250°C. Згідно результатів розрахунків, при підвищенні значення цієї температури до граничної ситуації при $T_{i0} = 170^\circ\text{C}$ (див. рис. 3, д, е), інтенсивність теплообміну паливної плівки зі стінкою знижується. Подальше підвищення початкової температури палива приводить до неможливої на практиці ситуації нагріву поршня за рахунок теплової енергії палива. Це дозволяє звужити означений діапазон температур для досліджуваного двигуна зверху до 170°C.

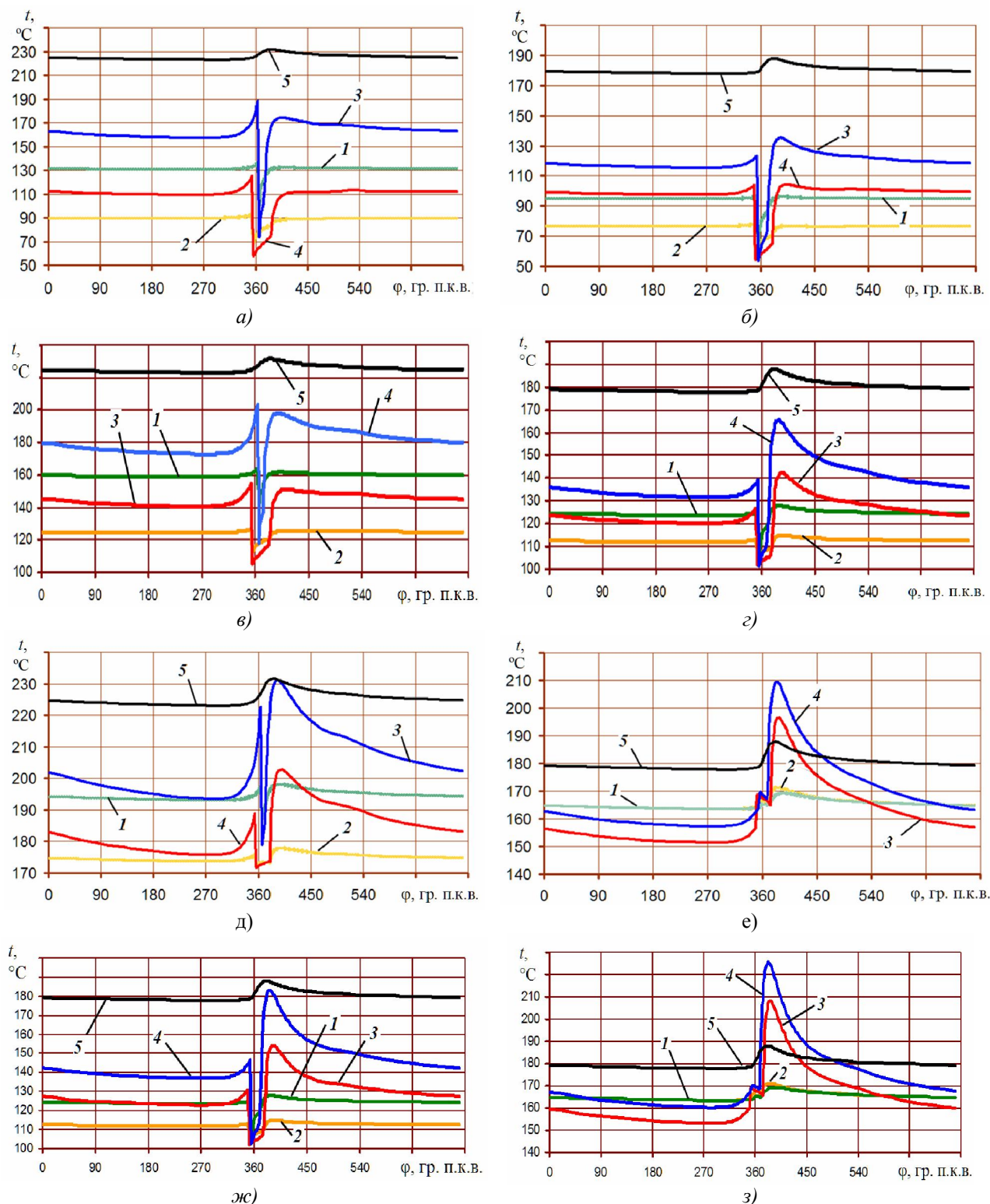


Рис. 3. Температурні коливання поверхні камери згоряння поршня дизеля 4ЧН12/14
 а – режим роботи I, $T_{i0} = 50 \text{ K}$, $\delta_n = 0,25 \text{ мм}$; б – режим роботи II, $T_{i0} = 50 \text{ K}$, $\delta_n = 0,25 \text{ мм}$;
 в – режимі роботи I, $T_{i0} = 100 \text{ K}$, $\delta_n = 0,25 \text{ мм}$; г – режим роботи II, $T_{i0} = 100 \text{ K}$, $\delta_n = 0,25 \text{ мм}$;
 д – режим роботи I, $T_{i0} = 170 \text{ K}$, $\delta_n = 0,25 \text{ мм}$; е – режим роботи II, $T_{i0} = 170 \text{ K}$, $\delta_n = 0,25 \text{ мм}$;
 ж – режимі II, $T_{i0} = 100 \text{ K}$, $\delta_n = 0,25 \text{ мм}$, $\delta_n = 0,05$; з – режим II, $T_{i0} = 170 \text{ K}$, $\delta_n = 0,25 \text{ мм}$, $\delta_n = 0,05$:
 1 – за відсутності ЧДТ, плівка утворена довгим паливним струменем; 2 – без ЧДТ, короткий струмінь; 3 – ЧДТ, довгий струмінь; 4 – ЧДТ, короткий струмінь; 5 – без ЧДТ, паливо відсутнє

Охолодження стінки під паливною плівкою у всіх розглянутих випадках на часткових режимах порівняно з номінальними є меншим. Аналогічний результат має місце для довгих паливних струменів порівняно з короткими.

Також в зоні взаємодії зі стінкою довгого паливного струменя чи на часткових режимах суттєвішим є повторне зростання температури стінки на фазі догорання (див. рис. 3, г, е). При початковій температурі палива $T_{i0} = 170$ К на режимі II максимум температури поверхні покриття навіть перевищує температуру поверхні без ЧДТ і палива на 10 і 20 К в зоні короткого і довгого струменів, відповідно. Це матиме позитивний наслідок у вигляді зменшення викидів вуглеводнів та твердих часток аналогічно до зони відсутності паливної плівки.

Відмінність отриманих ефектів пояснюються меншою кількістю палива, що досягла стінки і випаровується з неї в зоні плівки від довгих струменів і на невантажених режимах роботи дизеля.

При наявності нагару поверх корундового шару (див. рис. 3, ж, з) отримана аналогічна поведінка температури поверхні камери згорання, спостерігається посилення усіх розглянутих ефектів.

Висновки

В зоні присутності паливної плівки більший ефект ЧДТ має місце на режимі з меншими частотою обертання колінчастого валу та навантаженням.

На основі порівняння ефектів від довгих та коротких струменів встановлено, що при введенні теплоізоляції бажаним є зменшення плівкової частки сумішоутворення дизеля.

Уточнено можливий інтервал початкових температур паливної плівки в моделі робочого процесу проф. М. Ф. Разлейцева для двигуна 4ЧН12/14, який звужено з 50-250°C до 50-170°C.

Подальший напрямок робіт пов'язаний із розробкою двовимірної математичної моделі, що дозволить визначити вплив ЧДТ на характеристику випаровування палива, і залучення її до моделі робочого процесу.

Список літератури:

1. Марченко А.П. Підвищення економічності бензинового двигуна на різних режимах роботи при застосуванні частково-динамічної теплоізоляції поршнів / А.П. Марченко, В.В. Шпаковський, В.В. Пильов // *Вісник НТУ "ХПИ": "Транспортное машиностроение"*. – 2013. – Вып. 32. – С. 106-110. 2. Шпаковський В.В. Науково-технічні основи поліпшення показників ДВЗ застосуванням поршнів з корундовим шаром : автореф. дис. докт. техн. наук. : 05.05.03 / Шпаковський Володимир Васильович. – Харків, 2010. – 37 с. 3. Марченко А.П. Методика моделювання нестационарного високочастотного температурного состояния поршня двигателя внутреннего сгорания / А.П. Марченко, В.В. Пильов // *Известия высших учебных заведений: Машиностроение*. – 2013. – № 5. – С. 43-48. 4. Марченко А.П. Оценка влияния режимных факторов на параметры температурного высокочастотного колебания в поверхностном корундовом слое поршня / А.П. Марченко, В.В. Шпаковский, И.И. Сукачев, А.А. Прохоренко, И.Н. Карягин, В.В. Пылев // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2010. – №1. – С. 65-69. 5. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности: Под ред. А.Ф. Шеховцова. / Ф.И. Абрамчук, А.П. Марченко, Н.Ф. Разлейцев и др. – К. : Техника, 1992. – 272 с. 6. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: Учеб. пособ. для вузов. / Р.З. Кавтарадзе – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 472 с. 7. Барченко Ф.Б. Расчет рабочего цикла дизеля с учетом локальных температур поверхности камеры сгорания : автореф. дис. канд. техн. наук. : 05.04.02 / Барченко Филипп Борисович – М., 2011. – 16 с. 8. Марченко А.П. Моделирование прогрева паливної плівки на стінці камери згорання дизеля з частково-динамічною теплоізоляцією поршня / А.П. Марченко, В.В. Пильов // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2011. – №2. – С. 28-33. 9. Марченко А.П. Удосконалення математичної моделі випаровування паливної плівки зі стінки камери згорання дизеля / А.П. Марченко, В.В. Пильов, І.І. Сукачев // *Вісник НТУ "ХПИ": "Математичне моделювання в техніці та технологіях"*. – 2011. – № 42. – С. 133-143. 10. Пильов В.В. Удосконалення опису зносу паливних струменів тангенційним вихором робочого тіла в об'ємі камери згорання дизеля / В.В. Пильов // *Вісник НТУ "ХПИ": "Математичне моделювання в техніці та технологіях"*. – 2014. – № 6. – С. 169-175.

1. Marchenko A.P. Pidyvshchennia ekonomichnosti benzynovoho dvyhuna na ryznykh rezhymakh roboty pry zastosuvanni chastkovo-dynamichnoi teploizoliatsii porshniv / Marchenko A.P., Shpakovskiy V.V., Pylov V.V. // *Vestnik NTU "HPI": "Transportnoe mashinostroenie"*. – 2013. – Vyip. 32. – S. 106-110. 2. Shpakovskiy V.V. Naukovo-tekhnicni osnovy polipshennia pokaznykiv DVZ zastosuvanniam porshniv z korundovym sharom : avtoref. dys. dokt. tekhn. nauk. : 05.05.03 / Shpakovskiy Volodymyr Vasylovych. – Kharkiv, 2010. – 37 s. 3. Marchenko A.P. Metodika modelirovaniya nestatsionarnogo vyisokochastotnogo temperaturnogo sostoyaniya porshnya dvygatelya vnutrennego sgoraniya / A.P. Marchenko, V.V. PyilYov // *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy: Mashinostroenie*. – 2013. – № 5. – S. 43-48. 4. Otsenka vliyaniya rezhimnykh faktorov na parametry temperaturnogo vyisokochastotnogo kolebaniya v poverhnostnom korundovom sloe porshnya / A.P. Marchenko, V.V. Shpakovskiy, I.I. Sukachev, A.A. Prohorenko, I.N. Karyagin, V.V. Pyilev // *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. – 2010. – №1. – S. 65-69. 5. Sovremennyye dizeli: povysheniye toplivnoy ekonomichnosti i dlitel'noy prochnosti: Pod red. A.F. Shehovtsova. / F.I. Abramchuk, A.P. Marchenko, N.F. Razleytsev i dr. – K. : Tehnika, 1992. – 272 s. 6. Kavtaradze R.Z. Lokalnyiy teploobmen v porshnevyykh dvygatelyah: Ucheb. posob. dlya vuzov. / R.Z. Kavtaradze – M. : Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2007. – 472 s. 7. Barchenko F.B. Raschet rabocheho tsikla dizelya s uchetom lokalnykh temperatur poverhnosti kameryi sgoraniya : avtoref. dis. kand. tehn. nauk. : 05.04.02 / Barchenko Filipp Borisovich – M., 2011. – 16 s. 8. Marchenko A.P. Modelirovaniya prohrivu palyvnoi plivky na stintsii kameryi zghorianniya dzyelia z chastkovo-dynamichnoiu teploizoliatsiieiu porshnia / A.P. Marchenko, V.V. Pylov // *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2011. – №2. – S. 28-33. 9. Marchenko A.P. Udokonalennia matematichnoi modeli vyparovuvanniya palyvnoi plivky zi stinky kameryi zghorianniya dzyelia / Marchenko A.P., Pylov V.V., Sukachev I.I. // *Visnyk NTU "KhPU": "Matematychnе modeliuvaniya v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh"*. – 2011. – № 42. – S. 133-143. 10. Pylov V.V. Udokonalennia opysu znosu palyvnykh strumeniv tanhentsiynym vykhorem robochoho tila v ob'iemі kameryi

Bibliography (transliterated):

1. Marchenko A.P. Pidyvshchennia ekonomichnosti benzynovoho dvyhuna na ryznykh rezhymakh roboty pry zastosuvanni chastkovo-dynamichnoi teploizoliatsii porshniv / Marchenko A.P., Shpakovskiy V.V., Pylov V.V. // *Vestnik NTU "HPI": "Transportnoe mashinostroenie"*. – 2013. – Vyip. 32. – S. 106-110. 2. Shpakovskiy V.V. Naukovo-tekhnicni osnovy polipshennia pokaznykiv DVZ zastosuvanniam porshniv z korundovym sharom : avtoref. dys. dokt. tekhn. nauk. : 05.05.03 / Shpakovskiy Volodymyr Vasylovych. – Kharkiv, 2010. – 37 s. 3. Marchenko A.P. Metodika modelirovaniya nestatsionarnogo vyisokochastotnogo temperaturnogo sostoyaniya porshnya dvygatelya vnutrennego sgoraniya / A.P. Marchenko, V.V. PyilYov // *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedeniy: Mashinostroenie*. – 2013. – № 5. – S. 43-48. 4. Otsenka vliyaniya rezhimnykh faktorov na parametry temperaturnogo vyisokochastotnogo kolebaniya v poverhnostnom korundovom sloe porshnya / A.P. Marchenko, V.V. Shpakovskiy, I.I. Sukachev, A.A. Prohorenko, I.N. Karyagin, V.V. Pyilev // *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. – 2010. – №1. – S. 65-69. 5. Sovremennyye dizeli: povysheniye toplivnoy ekonomichnosti i dlitel'noy prochnosti: Pod red. A.F. Shehovtsova. / F.I. Abramchuk, A.P. Marchenko, N.F. Razleytsev i dr. – K. : Tehnika, 1992. – 272 s. 6. Kavtaradze R.Z. Lokalnyiy teploobmen v porshnevyykh dvygatelyah: Ucheb. posob. dlya vuzov. / R.Z. Kavtaradze – M. : Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman, 2007. – 472 s. 7. Barchenko F.B. Raschet rabocheho tsikla dizelya s uchetom lokalnykh temperatur poverhnosti kameryi sgoraniya : avtoref. dis. kand. tehn. nauk. : 05.04.02 / Barchenko Filipp Borisovich – M., 2011. – 16 s. 8. Marchenko A.P. Modelirovaniya prohrivu palyvnoi plivky na stintsii kameryi zghorianniya dzyelia z chastkovo-dynamichnoiu teploizoliatsiieiu porshnia / A.P. Marchenko, V.V. Pylov // *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2011. – №2. – S. 28-33. 9. Marchenko A.P. Udokonalennia matematichnoi modeli vyparovuvanniya palyvnoi plivky zi stinky kameryi zghorianniya dzyelia / Marchenko A.P., Pylov V.V., Sukachev I.I. // *Visnyk NTU "KhPU": "Matematychnе modeliuvaniya v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh"*. – 2011. – № 42. – S. 133-143. 10. Pylov V.V. Udokonalennia opysu znosu palyvnykh strumeniv tanhentsiynym vykhorem robochoho tila v ob'iemі kameryi

Поступила в редакцию 01.07.2014

Марченко Андрій Петрович – доктор техн. наук, проф., завідувач кафедрою двигунів внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua

Пильов Вячеслав Володимирович – аспірант кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: vv3pylov@i.ua

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНКИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПОРШНЯ СО СЛОЕМ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ В ЗОНЕ НАЛИЧИЯ ТОПЛИВНОЙ ПЛЕНКИ

А. П. Марченко, В. В. Пылёв

В статье приведены результаты моделирования нестационарного высокочастотного температурного состояния теплоизолированной стенки камеры сгорания поршня автотракторного двигателя в зоне наличия на ее поверхности топливной пленки. Использована одномерная математическая модель, которая учитывает теплообмен пленки со стенкой и рабочим телом, перемешивание слоев топлива и процесс его испарения. Исследованы эффекты частично-динамической теплоизоляции, которые возникают при этом, и влияние на них режимных факторов, толщины и начальной температуры топливной пленки.

THE CHARACTER OF COATED PISTON COMBUSTION CHAMBER SURFACE TEMPERATURE STATE IN THE REGIONS OF PRESENCE OF THE FUEL FILM

A. P. Marchenko, V. V. Pylyov

The simulation results of the nonstationary high-frequency temperature state of the coated piston combustion chamber surface of the automotive diesel engine in the regions of the fuel film presence are discussed in the article. The one-dimensional mathematical model taking into account heat exchange among fuel, wall and gas as well as processes of mixing and vaporisation of the fuel in the film is applied. The revealed partially-dynamic heat insulation effects conjointly with influence on them from operation conditions and initial fuel film thickness and temperature are analyzed.

УДК 621.436

А.А. Прохоренко

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ДИЗЕЛЯ С АККУМУЛЯТОРНОЙ СИСТЕМОЙ ТОПЛИВОПОДАЧИ КАК РЕГУЛИРУЕМОГО ОБЪЕКТА

В статье рассмотрен вывод системы дифференциальных уравнений, описывающих динамику звеньев комбинированного дизеля с автономным турбонаддувом и аккумуляторной топливной системой. Показано, что эта система уравнений имеет третий порядок, или на порядок больше, чем у двигателя без наддува. Определен вектор независимых координат, влияющих на состояние системы. Полученная в результате математическая модель данного объекта регулирования может быть использована для синтеза его системы автоматического управления.

В современных дизелях широко применяется топливная аппаратура (ТА) аккумуляторного типа с электромагнитными (или пьезоэлектрическими) устройствами управления впрыскиванием – форсунками [1]. Регулирование величины цикловой подачи в такой ТА осуществляется изменением продолжительности управляющего электрического импульса, открывающего с помощью электропривода специальный запорный орган. Поэтому применение регуляторов с механическим чувствительным элементом для таких двигателей невозможно, так как сопряжено со значительными сложностями преобразования механических сигналов в электрические. Этот факт обосновывает необходимость применения для дизелей с аккумуляторной ТА

только электронных регуляторов, которые на основе показаний электрических чувствительных элементов (датчиков) вырабатывают электрический же сигнал управления.

Известно, что системой автоматического регулирования (САР) является функциональная совокупность объекта регулирования и регулятора [2]. Данная схема в полной мере распространяется и на САР дизелей с аккумуляторной ТА и электронным регулятором. Однако, функциональная схема дизеля с аккумуляторной системой топливоподачи имеет одно существенное отличие от традиционной – наличие звена в виде топливного аккумулятора, обладающего собственными динамическими свойствами.