

А.П. Марченко, д-р техн. наук, В.В. Пильов, магістр

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГРІВУ ПАЛИВНОЇ ПЛІВКИ НА СТІНЦІ КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ДИЗЕЛЯ З ЧАСТКОВО-ДИНАМІЧНОЮ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЄЮ ПОРШНЯ

Постановка проблеми

Введення частково-динамічної теплоізоляції поверхні поршня двигуна внутрішнього згорання, що покликане підвищити його ресурс, зменшити витрату палива і шкідливі викиди, спричиняє суттєве коливання температури поверхні камери згорання (КЗ) протягом робочого циклу [1]. Через це температура частини палива, яка потрапляє на стінку КЗ, і його випаровування, імовірно, мають відмінності від випадку застосування традиційних поршнів.

Оскільки випаровування паливної плівки є одним з визначальних чинників сумішоутворення та згорання у циліндрі дизеля, а внаслідок цього якості його робочого процесу, вплив теплоізоляції на перебіг цього явища потребує докладного вивчення.

Аналіз публікацій

У відомих роботах при моделюванні робочого процесу питання врахування випаровування палива зі стінки КЗ не розкрито [2, 3] або його врахування є практично емпіричним [4, 5]. Тут паливна плівка розглядається як сукупність окремих крапель, що миттєво приймають температуру стінки і зберігають її протягом випаровування. При цьому швидкість процесу випаровування не залежить від товщини паливної плівки, теплообмін між стінкою, паливом та робочим тілом не моделюється і дотримання закону збереження енергії не забезпечується.

Метою роботи є розробка математичної моделі прогріву паливної плівки на стінці камери згорання поршня дизеля та здійснення розрахунків для випадків наявності та відсутності її частково-динамічної теплоізоляції.

Математична модель

В основу моделі, що розроблено, було покладено одновимірну модель для визначення температурного стану стінки, приведену в [6]. Тут багатопарова стінка поршня в загальному вигляді складається з основного матеріалу, штучної або природної частково-динамічної теплоізоляції, тобто низькотеплопровідного покриття чи нагару, і паливної плівки, яка існує лише частину робочого циклу двигуна. Між усіма шарами відбувається теплооб-

мін. Внаслідок процесу дифузії та руху паливної плівки по стінці її шари зазнають перемішування, що у моделі, аналогічно до [7], замінюється миттєвим усередненням температури паливної плівки по її товщі.

Паливна плівка з початковими температурою T_{i0} і товщиною h_0 утворюється у момент досягнення паливним факелом стінки, що відповідає куту повороту колінчастого вала (КВ) φ_w . При досягненні паливом температури початку кипіння відбувається процес пофракційного випаровування. Температура кипіння найлегшої фракції палива, яка ще залишилася в плівці товщиною h , за даними [8] описано наступною залежністю, К:

$$T_{\text{кин}}(h) = 170,89 + 325,46 \cdot \left(1 - \frac{h}{h_0}\right) - 522,32 \cdot \left(1 - \frac{h}{h_0}\right)^2 + 384,97 \cdot \left(1 - \frac{h}{h_0}\right)^3.$$

При куті повороту КВ φ_d починається дифузійне згорання і частина палива, що не випарувалася, вилучається з поверхні.

Теплопідведення до паливної плівки чи, за її відсутності, безпосередньо до поверхні КЗ, описано за допомогою граничних умов 3-го роду, де температура робочого тіла T_e та коефіцієнт теплообміну α_e є функціями кута повороту КВ. Граничні умови зі сторони масляного охолодження з параметрами T_m , α_m незмінні у часі.

З урахуванням рекомендацій [9] задача розв'язувалась методом скінченних різниць за явною схемою. У стінці загальною товщиною l , до якої відноситься і шар теплоізоляції δ_n , виділяють k вузлів на відстані Δx один від одного. Вводяться три допоміжні вузли для паливної плівки: один на поверхні теплопідводу, другий на глибині Δx , а третій на половині цієї відстані від поверхні стінки. Крок розрахунку за часом Δt визначається з умови стійкості рішення. Схему цієї сітки подано на рис. 1.

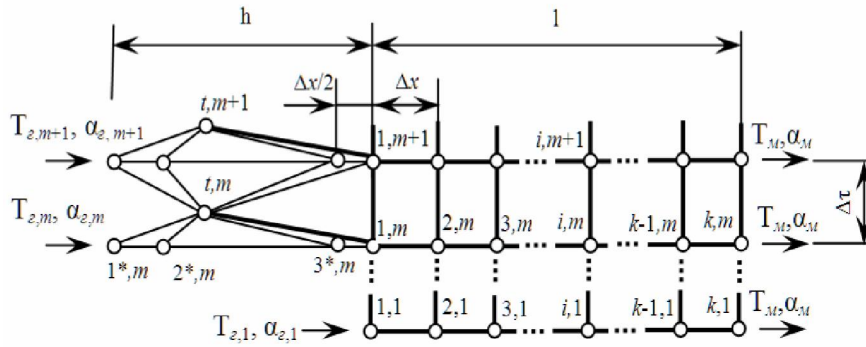


Рис. 1. Схема розрахункової сітки

Сіткові рівняння моделі мають наступний вигляд:

1. Закон теплопровідності для однорідних матеріалів:

$$\rho_i c_i \frac{T_{i,m+1} - T_{i,m}}{\Delta\tau} = \lambda_i \frac{T_{i-1,m} - 2T_{i,m} + T_{i+1,m}}{\Delta x^2},$$

$$i \in \{2, 3, \dots, k-1\} / \left\{ \left[\frac{\delta_n}{\Delta x} \right], \left[\frac{\delta_n}{\Delta x} \right] + 1 \right\},$$

де T – температура, λ – теплопровідність матеріалу, c – теплоємність, ρ – густина, індекси позначають відповідність до певного вузла, квадратні дужки – ціла частина числа.

2. Закон теплопровідності для стику матеріалів:

$$\rho_i c_i \frac{T_{i,m+1} - T_{i,m}}{\Delta\tau} =$$

$$= \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1} \cdot \frac{T_{i+1,m} - T_{i,m}}{\Delta x} - \lambda_i + \lambda_{i-1} \cdot \frac{T_{i,m} - T_{i-1,m}}{\Delta x}}{2 \Delta x},$$

$$i \in \left\{ \left[\frac{\delta_n}{\Delta x} \right], \left[\frac{\delta_n}{\Delta x} \right] + 1 \right\}, \delta_n \neq 0.$$

3. Граничні умови зі сторони камери згоряння за відсутності палива:

$$\rho_1 c_1 \cdot \frac{T_{1,m+1} - T_{1,m}}{\Delta\tau} =$$

$$= \frac{\lambda_1 \cdot \left(\frac{T_{2,m+1} - T_{1,m+1}}{\Delta x} + \frac{T_{2,m} - T_{1,m}}{\Delta x} \right) / 2}{\Delta x / 2} +$$

$$+ \frac{(\alpha_{\varepsilon, m+1} (T_{\varepsilon, m+1} - T_{1,m+1}) + \alpha_{\varepsilon, m} (T_{\varepsilon, m} - T_{1,m})) / 2}{\Delta x / 2},$$

$$h_m \leq \frac{3}{2} \Delta x.$$

4. Визначення температури палива в першому допоміжному вузлі:

$$\rho_t c_t \cdot \frac{T_{1,m+1}^* - T_{t,m}}{\Delta\tau} = - \frac{T_{2,m+1}^* - T_{1,m+1}^* \cdot \lambda_t}{\Delta x / 2} +$$

$$+ \frac{(\alpha_{\varepsilon, m+1} (T_{\varepsilon, m+1} - T_{1,m+1}^*) + \alpha_{\varepsilon, m} (T_{\varepsilon, m} - T_{t,m})) / 2}{\Delta x / 2},$$

$$h_m > \frac{3}{2} \Delta x,$$

де T^* – температура в допоміжних вузлах, а індекс t позначає параметри палива.

5. Визначення температури палива в другому допоміжному вузлі:

$$T_{2,m+1}^* = T_{t,m}, h_m > \frac{3}{2} \Delta x.$$

6. Визначення температури палива в третьому допоміжному вузлі:

$$\rho_t c_t \cdot \frac{T_{3,m+1}^* - T_{t,m}}{\Delta\tau} = \frac{\lambda_1 + \lambda_t \cdot \frac{T_{1,m} - T_{t,m}}{\Delta x / 2}}{3 \Delta x / 4}, h_m > \frac{3}{2} \Delta x.$$

7. Визначення температури поверхні КЗ за наявності палива:

$$\rho_1 c_{1,m} \cdot \frac{T_{1,m+1} - T_{1,m}}{\Delta\tau} =$$

$$= \frac{\lambda_1 \cdot \frac{T_{2,m} - T_{1,m}}{\Delta x} - \lambda_1 + \lambda_t \cdot \frac{T_{1,m} - T_{t,m}}{\Delta x / 2}}{3 \Delta x / 4}, h_m > \frac{3}{2} \Delta x.$$

8. Визначення товщини паливної плівки за відсутності випаровування:

$$h_{m+1} = h_m,$$

$$T_{1,m+1}^* \cdot \frac{\Delta x / 2}{h_m} + T_{2,m+1}^* \cdot \left(1 - \frac{3 \Delta x / 2}{h_m} \right) + T_{3,m+1}^* \cdot \frac{\Delta x}{h_m} \leq T_{кин}(h_m),$$

$$m \in \left\{ \left[\frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n \Delta\tau} \right], \left[\frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n \Delta\tau} \right] + 1, \dots \right.$$

$$\left. \dots, \left[\frac{\varphi_d + 720 \cdot (j-1)}{6n \Delta\tau} \right] - 2 \right\}, j \in N,$$

де n – частота обертання КВ, N – множина натуральних чисел.

9. Визначення товщини паливної плівки при випаровуванні:

$$\begin{aligned}
 & h_m c_l \left(T_{1,m+1}^* \cdot \frac{\Delta x/2}{h_m} + T_{2,m+1}^* \cdot \left(1 - \frac{3\Delta x/2}{h_m} \right) + \right. \\
 & \left. + T_{3,m+1}^* \cdot \frac{\Delta x}{h_m} - T_{\text{кун}}(h_m) \right) = \\
 & = \frac{h_m + h_{m+1}}{2} c_l (T_{\text{кун}}(h_{m+1}) - T_{\text{кун}}(h_m)) + r(h_m - h_{m+1}), \\
 & T_{1,m+1}^* \cdot \frac{\Delta x/2}{h_m} + T_{2,m+1}^* \cdot \left(1 - \frac{3\Delta x/2}{h_m} \right) + \\
 & + T_{3,m+1}^* \cdot \frac{\Delta x}{h_m} > T_{\text{кун}}(h_m), \\
 & m \in \left\{ \left[\frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right], \left[\frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] + 1, \dots \right. \\
 & \left. \dots, \left[\frac{\varphi_d + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] - 2 \right\}, j \in N,
 \end{aligned}$$

де r – питома теплота пароутворення.

10. Визначення товщини паливної плівки на інших ділянках циклу:

$$\begin{aligned}
 h_m = 0, m \in \left\{ 0, 1, \dots, \left[\frac{\varphi_w}{6n\Delta\tau} \right] - 1 \right\} \cup \left\{ \left[\frac{\varphi_d + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right], \right. \\
 \left. \left[\frac{\varphi_d + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] + 1, \dots, \left[\frac{\varphi_w + 720 \cdot j}{6n\Delta\tau} \right] - 1 \right\}, j \in N.
 \end{aligned}$$

11. Визначення температури палива у разі відсутності випаровування:

$$\begin{aligned}
 & T_{l,m+1} = T_{1,m+1}^* \cdot \frac{\Delta x/2}{h_m} + T_{2,m+1}^* \cdot \left(1 - \frac{3\Delta x/2}{h_m} \right) + T_{3,m+1}^* \cdot \frac{\Delta x}{h_m}, \\
 & T_{1,m+1}^* \cdot \frac{\Delta x/2}{h_m} + T_{2,m+1}^* \cdot \left(1 - \frac{3\Delta x/2}{h_m} \right) + T_{3,m+1}^* \cdot \frac{\Delta x}{h_m} \leq T_{\text{кун}}(h_m), \\
 & m \in \left\{ \left[\frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right], \left[\frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] + 1, \dots \right. \\
 & \left. \dots, \left[\frac{\varphi_d + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] - 2 \right\}, j \in N.
 \end{aligned}$$

12. Визначення температури палива у разі наявності випаровування:

$$\begin{aligned}
 & T_{l,m+1} = T_{\text{кун}}(h_{m+1}), \\
 & T_{1,m+1}^* \cdot \frac{\Delta x/2}{h_m} + T_{2,m+1}^* \cdot \left(1 - \frac{3\Delta x/2}{h_m} \right) + T_{3,m+1}^* \cdot \frac{\Delta x}{h_m} > T_{\text{кун}}(h_m), \\
 & m \in \left\{ \left[\frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right], \left[\frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] + 1, \dots \right.
 \end{aligned}$$

$$\left. \dots, \left[\frac{\varphi_d + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right] - 2 \right\}, j \in N.$$

13. Граничні умови зі сторони охолодження:

$$\begin{aligned}
 & \rho_k c_k \cdot \frac{T_{k,m+1} - T_{k,m}}{\Delta\tau} = \\
 & = \frac{\alpha_m (2T_m - T_{k,m+1} - T_{k,m})/2}{\Delta x/2} - \frac{\lambda_k \cdot (T_{k,m} - T_{k-1,m})}{\Delta x/2};
 \end{aligned}$$

14. Початкова умова:

$$T_{i,1} = T_0, i \in \{1, 2, \dots, k\},$$

де T_0 – початкова температура стінки.

15. Початкова температура паливної плівки:

$$T_{t, \left[\frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right]} = T_{t0}, j \in N.$$

16. Початкова товщина паливної плівки:

$$h_{\left[\frac{\varphi_w + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right]} = h_0, j \in N.$$

Приведена модель була реалізована у вигляді комп'ютерної програми мовою Delphi. Розрахунок припиняється при j , для якого починає виконуватись умова

$$\left| T_{1, \left[\frac{360 + 720 \cdot (j-1)}{6n\Delta\tau} \right]} - T_{1, \left[\frac{360 + 720 \cdot j}{6n\Delta\tau} \right]} \right| < 0,02 \text{ К}.$$

Отриманий при цьому температурний стан стінки і паливної плівки як залежність від кута повороту КВ φ , вважаємо остаточною.

Модельовання та його результати

Розрахунки проводилось для дизеля 6ЧН13/11,5 на режимі номінальної потужності $N_e = 130$ кВт, при частоті обертання КВ $n = 2100$ хв⁻¹. Товщина стінки поршня була прийнята $l = 16,3$ мм. Крок сітки Δx за просторовою координатою варіювався в діапазоні 0,005..0,1 мм. Цьому відповідає $\Delta\tau \approx 10^{-6}$ с.

Граничні умови взято з [10]. Для поверхні КЗ їх подано на рис. 2, а на поверхні охолодження вони становлять $T_m = 363$ К, $\alpha_m = 2100$ Вт/(м·К). Початкова температура $T_0 = 520$ К. Кут початку взаємодії палива зі стінкою КЗ $\varphi_w = 358$ гр. п.к.в., кут початку дифузійного згоряння палива $\varphi_d = 371,4$ гр. п.к.в., початкова товщина паливної плівки $h_0 = 0,3$ мм. Невідомим параметром є початкова температура палива в момент φ_w , яку можна прийняти з діапазону $T_{t0} = 323..523$ К [10].

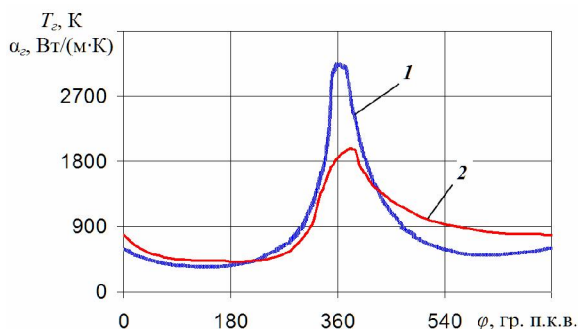


Рис. 2. Температура газу (1) та коефіцієнт теплообміну (2) зі сторони теплопідведення на номінальному режимі роботи двигуна 6ЧН13/11,5

Прийняті теплофізичні властивості матеріалів наведені у таблиці.

Таблиця Теплофізичні властивості матеріалів

| Матеріал | λ , Вт/(м·К) | c , Дж/(кг·К) | ρ , кг/м ³ |
|--|-------------------------|--------------------|-------------------------------|
| АЛ25 | 156 | 863 | 2720 |
| Корунд (Al ₂ O ₃) | 2,85 | 837 | 3200 |
| Нагар | 1,7 | 1260 | 2000 |
| Паливо | 0,14 | 2250 | 845 |

Питома середня теплота пароутворення палива $r = 252$ кДж/кг.

Дослідження здійснювалось для неізолюваної стінки зі сплаву АЛ25, для стінки з шаром корундового покриття (Al₂O₃) $\delta_n = 0,11$ мм та для стінок з шарами нагару $\delta_n = 0,11$ і $1,75$ мм. Товщина

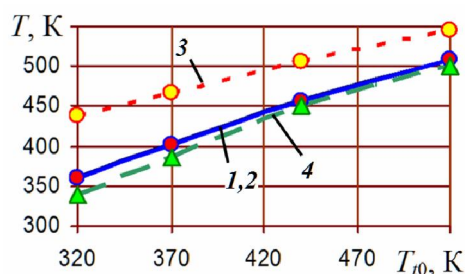


Рис. 4. Залежності середніх температур паливної плівки (1,4-6) та стінки під плівкою (2,3) від початкової температури палива:

1,2 – стінка з АЛ25; 3,4 – стінка з покриттям Al₂O₃ $\delta_n = 0,11$ мм; 5 – нагар $\delta_n = 0,05$ мм; 6 – нагар $\delta_n = 1,75$ мм

Але в разі наявності штучної або природної теплоізоляції встановлено, що ця картина порушується – незважаючи на зростання температури поверхні КЗ у понад 1,5 рази, маємо зменшення температури паливної плівки в 1,15-1,2 рази. Напри-

клад, при початковій температурі палива $T_{10} = 370$ К на стінці без нагару паливо прогрівається до 406 К (крива 1), на стінці з нагаром при $\delta_n = 0,05$ мм – до 384,5 К (крива 5), а на стінці з

покриття 0,11 мм для такої КЗ забезпечує мінімум поверхневої температури підчас такту наповнення. На нагарі відповідний розмах температурного коливання досягається при його шарі 0,05 мм. За товщини нагару 1,75 мм його температура у частині КЗ, де паливна плівка відсутня, перевищує критичну температуру фазового переходу палива (710 К).

Приклад отриманих у розрахунках температурних коливань для вузла 1 наведено на рис. 3.

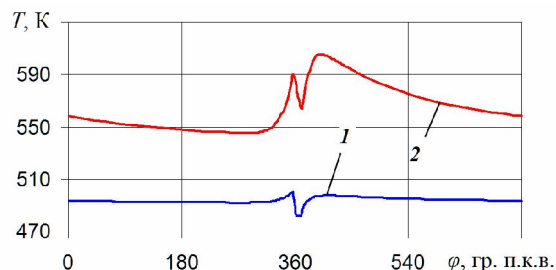
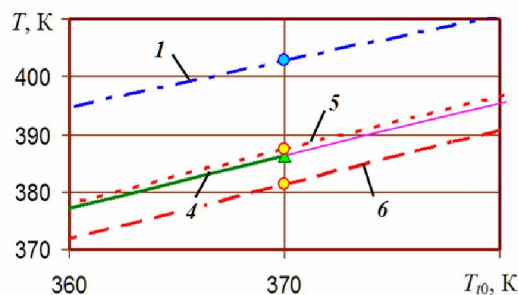


Рис. 3. Температурні коливання поверхні КЗ поршня зі сплаву АЛ25 (1) та з шаром корунду $\delta_n = 0,11$ мм (2) при $T_{10} = 520$ К

Визначені середні температури стінки і палива, в залежності від невідомої початкової температури палива подано на рис. 4. Видно, що на стінці з АЛ25 температура паливної плівки практично відстежує температуру стінки (криві 1, 2 рис. 4, а). Це повністю відповідає існуючій теорії випаровування палива в пристінній зоні КЗ [10].



шаром корундового покрытия – до 389,5 К (крива 4). При цьому на нагарі температура плівки досягає рівня 390,5 К (крива 6) тільки при максимальному розглянутому значенні шару нагару, коли $\delta_n = 1,75$ мм.

Висновки

1. Порівняння температури стінки під паливною плівкою та температури самої плівки підтвердило, що на початку експлуатації двигуна температура палива відслідковує температуру стінки.

2. Поява нагару на поверхні КЗ під час експлуатації двигунів або застосування штучної частково-динамічної теплоізоляції поршня приводить до зростання температури стінки під паливною плівкою, при зменшенні температури палива. Це означає, що за температурою теплоізоляції не можна встановити, чи здійснюється фазовий перехід палива при контакті з поверхнею, а відомі методики випаровування палива зі стінки КЗ потребують уточнення.

3. Порівняння температури плівок на стінці з нагаром при зміні товщини останнього в досліджуваному діапазоні показало, що товщина нагару слабо (в межах 6 К) впливає на прогрів паливної плівки. При зміні товщини корундового шару цей вплив є аналогічним.

4. Покрытие якнайменше не погіршує випаровування палива відносно дизелів з традиційною конструкцією поршня, які мають в експлуатації нагар.

Подальший напрямок роботи пов'язаний з моделюванням випаровування паливної плівки на стадії дифузійного згоряння.

Список літератури:

1. 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. 2. Зеленцов А.А. Исследование локального теплообмена в камере сгорания дизеля, конвертированного на природный газ : автореф. дис. канд. техн. наук. : 05.04.02 / Зеленцов Андрей Александрович. – М., 2011. – 16 с. 3. Абрамчук Ф.И. Программный комплекс для моделирования

внутрицилиндровых процессов ДВС / Ф.И. Абрамчук, А.Н. Авраменко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – №2. – С. 7-12. 4. Процессы в перспективных дизелях / А.Ф. Шеховцов, Ф.И. Абрамчук, В.И. Крутов и др. ; под ред. А.Ф. Шеховцова. – Харьков : Изд-во «Основа» при Харьк. ун-те, 1992. – 352 с. 5. Марченко А.П. Влияние температуры стенок камеры сгорания на испарение и выгорание топлива в форсированных дизелях / А.П. Марченко, И.Н. Карягин, И.И. Сукачев // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – №2. – С. 40-46. 6. Оценка влияния режимных факторов на параметры температурно-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. 7. Итинская Н.И. Справочник по топливу, маслам и техническим жидкостям / Н.И. Итинская, Н.А. Кузнецов. – М. : Колос, 1982. – 208 с. 8. Основы горения углеводородных топлив. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 641 с. 9. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях : учеб. пособ. для вузов / Р.З. Кавтарадзе. – 2 изд., испр. и доп. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2007. – 472 с. 10. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности / Ф.И. Абрамчук, А.П. Марченко, Н.Ф. Разлейцев и др. ; под ред. А.Ф.Шеховцова. – К. : Техника, 1992. – 272 с.

Bibliography (transliterated):

1. Shpakovskij V.V. Naukovo-tekhnichni osnovi polipshennya pokaznikov DVZ zastosuvannjam porshniv z korundovim шаром : avtoref. dis. dokt. texn. nauk. : 05.05.03 / Shpakovskij Volodimir Vasil'ovich. – Xarkiv, 2010. – 37 s. 2. Zelencov A.A. Issledovanie lokal'nogo teploobmena v kamere sgoraniya dizelya, konvertirovannogo na prirodnyj gaz : avtoref. dis. kand. texn. nauk. : 05.04.02 / Zelencov Andrej Aleksandrovich. – M., 2011. – 16 s. 3. Abramchuk F.I. Programmnyj kompleks dlya modelirovaniya vnutricilindrovyyx processov DVS / F.I. Abramchuk, A.N. Avramenko // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2010. – №2. – S. 7-12. 4. Processy v perspektivnyx dizelyax / A.F. Shexovcov, F.I. Abramchuk, V.I. Krutov i dr. ; pod red. A.F. Shexovcova. – Xar'-kov : Izd-vo «Osnova» pri Xar'k. un-te, 1992. – 352 s. 5. Marchenko A.P. Vliyanie temperatury' stенок kamery' sgoraniya na isparenie i vy'goranie topliva v forsirovannyx dizelyax / A.P. Marchenko, I.N. Karyagin, I.I. Sukachev // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2010. – №2. – S. 40-46. 6. Ocenka vliyaniya rezhimny'x faktorov na parametry' temperaturnogo vy'sokochastotnogo kolebaniya v poverxnostnom korundovom sloe porshniya / A.P. Marchenko, V.V. Shpakovskij, I.I. Sukachev i dr. // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2010. – №1. – S. 65-69. 7. Itinskaya N.I. Spravochnik po toplivu, maslam i texnicheskim zhidkostyam / N.I. Itinskaya, N.A. Kuznecov. – M. : Kolos, 1982. – 208 s. 8. Osnovy' goreniya uglevodородny'x topliv. – M.: Izd-vo inostr. lit., 1960. – 641 s. 9. Kavtaradze R.Z. Lokal'nyj teploobmen v porshnevyyx dvigatelyax : ucheb. posob. dlya vuzov / R.Z. Kavtaradze. – 2 izd., ispr. i dop. – M. : Izd-vo MGTU im. N.E'.Baumana, 2007. – 472 s. 10. Sovremennye dizeli: povыshenie toplivnoj e'konomichnosti i dlitel'noj prochnosti / F.I. Abramchuk, A.P. Marchenko, N.F. Razlejev i dr. ; pod red. A.F.Shexovcova. – K. : Te'xnika, 1992. – 272 s.