

УДК 539.3:539.538

ОЦІНЮВАННЯ ВТРАТ ВОДЕНЬВМІСНИХ ГАЗІВ ПІД ЧАС ЗНОШУВАННЯ ПОРШНЯ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ

О. І. БАЛИЦЬКИЙ¹, К. Ф. АБРАМЕК², М. МРУЗІК², Т. ШТЕК², Т. ОСПОВІЧ²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² Західноморський технологічний університет, Щецин, Польща

Запропоновано модель втрат робочих газів, яка враховує прогнозування інтенсивності продувань на підставі основних параметрів двигуна (діаметра циліндра, кількості кілець та циліндрів, кроку поршня), зношування системи поршень–втулка–циліндр за дії воденьвмісних середовищ, а також впливу обертової швидкості колінвала двигуна та дає змогу виявити різницю інтенсивності продувань в середньому до 35%.

Ключові слова: моделювання, зношування системи поршень–втулка–циліндр, продування воденьвмісних газів.

Застосування водневого пального у двопаливних двигунах внутрішнього згорання з іскровим та самозапаленням (СЗ) на відміну від існуючих технологій використання водню в електродвигунах на водневих паливних комірках вимагає пошуку ефективних діагностичних параметрів зношування системи поршень–втулка–циліндр (ПВЦ) [1–4]. Тому дослідження впливу водню на зміну щільності робочого простору (підвищення інтенсивності продувань робочих газів до блока колінвала) є актуальними, беручи до уваги щорічне збільшення випуску автомобілів (в т. ч. Toyota (модель Mirai) – першого комерційного водневого автомобіля) на водневому пальному, інтенсивну розбудову мережі водневих заправок. В існуючих двигунах, де застосовують як пальне природний, сланцевий газ або пропан-бутан, існує можливість додавання водню для підвищення ефективності спалювання.

Зменшення наповнення камери згорання під час продування робочих газів у поршневих двигунах спостерігаємо головню через нещільність між бічною поверхнею поршня, кільцем і циліндричною втулкою, а також замків кілець. Інтенсивність продувань є різною для різних конструкцій двигунів і може свідчити про якість монтажу блока циліндр–кільце–втулка, а також про їх зношування.

Методика досліджень. На продування робочих газів впливає багато конструкційних і експлуатаційних параметрів, а саме: кількість кілець і циліндрів, геометрія замка кільця та нещільність у ньому, розподіл напружень у кільці, осьова висота кільця, якість його поверхні та поперечний переріз, відстань від кільця до дна поршня, зазор у кільцевій частині поршня, якість виконання кільця та циліндра, відхилення від вальцьованого розміру циліндра, зменшення гладкості (збільшення шорсткості) поверхні циліндра, ступінь стискання робочих воденьвмісних газів, обертова швидкість двигуна, температура та сорт змащувальної оливи, а також охолоджувального середовища, навантаження двигуна, зношування системи ПВЦ, зміна тиску в робочому об'ємі і коливання кілець.

Якість палива (в т. ч. чистота воденьвмісного) впливає на горіння, а також на максимальний тиск в робочому об'ємі. Через вичерпність викопних ресурсів ведуться пошуки альтернативних джерел, зокрема використання водню в сучасних двигунах внутрішнього згорання (за 100% концентрації в робочому об'ємі

Контактна особа: О. І. БАЛИЦЬКИЙ, e-mail: balitski@ipm.lviv.ua

або як додаток до існуючих газоподібних палив). Застосування водню суттєво впливатиме на продування робочих газів до блока колінвала. Тому необхідні ґрунтовні дослідження в цьому напрямку, зокрема для зменшення негативної дії водневого пального на матеріали поршневих двигунів. Математична модель продування воденьвмісних робочих газів до блока колінвала побудована для типів двигунів, які використовують у легкових і вантажних автомобілях: Mercedes-Benz (OM 646.962, OM 602.940, OM 617.913), експериментального двигуна SB-3.1, ліцензованого двигуна Leyland SW-680, двигуна автомобіля STAR-359, двигуна VW AFN 1,9 TDI, а також двигуна з ІЗ 115С.076. Досліджували на експериментальному двигуні SB-3.1, який є фрагментом циліндра з двигуна SW-680.

Технічний стан системи впорскування палива впливає на його спалювання і, відповідно, на продування [2, 5]. Вимірювали інтенсивність продування також за від'ємних температур навколишнього середовища, використовуючи камеру для випробування двигунів за низьких температур, створену на кафедрі експлуатації автомобілів Західнопоморського технологічного університету.

Результати та їх обговорення. Модель для оцінки інтенсивності продувань у різних типах двигунів передбачає постійні умови їх вимірювання. З досліджень випливає, що під час експлуатації кільця знерухомлюються через накопичення нагару, а також вібрації, що призводить до зростання інтенсивності продувань.

Температура змащувальної оливи може впливати не тільки на зміну інтенсивності продувань, але також на їх перебіг, який потрібно описувати зовсім іншою математичною функцією. Для цього необхідно встановити умови, для яких аналітичний опис обов'язковий [3]. Припускаємо нормальний режим роботи двигуна за експлуатаційної температури змащувальної оливи (двигун розігрітий до робочої температури). Зауважимо, що під час експлуатації двигуна зміну інтенсивності продувань газів до блока колінвала описують (в певному наближенні) лінійною залежністю [4].

Інтенсивність продувань Q (m^3/s) залежить від багатьох конструкційних і експлуатаційних параметрів:

$$Q = f(n, \varepsilon, p_i, T, D_o, d_z, z, i, l_i, s, k, \rho, \tau), \quad (1)$$

де n – обертова швидкість колінвала двигуна, min^{-1} ; $\varepsilon = (V_s + V_k) / V_k$ – ступінь стискання (V_s і V_k – об'єм циліндра під час стрибка поршня, коли він знаходиться в максимально нижньому і максимально верхньому положеннях, відповідно); p_i – усереднене значення створеного тиску; D_o – діаметр циліндра, m ; d_z, z – параметри зношування елементів системи ПВД; i – кількість циліндрів; T – температура; l_i – кількість ущільнювальних кілець; s – крок поршня, m ; k – різновид кромки ущільнювального кільця; ρ – тип змащувальної оливи (з визначенням її густини); τ – такт циклу (дво- або чотиритактний).

Результати вимірювань інтенсивності продувань (рис. 1) свідчать про те, що деякі параметри можна ранжувати в певних групах. До першої групи належать діаметр циліндра, крок поршня, кількість ущільнювальних кілець і ступінь стискання. До другої групи відносимо вид зазору замка кільця, різновидність кромки кільця, якість виготовлення порш-

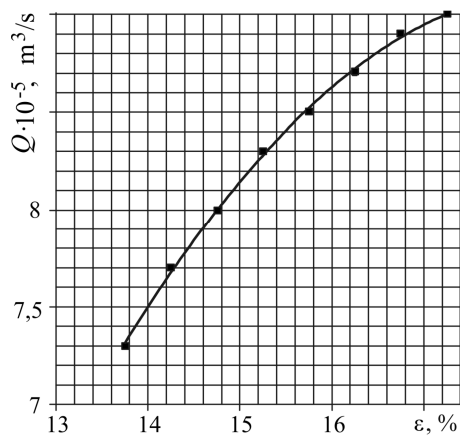


Рис. 1. Вплив зміни ступеня стискання ε на інтенсивність продувань Q .

Fig. 1. Influence of changes in compression ratio ε on blow-out intensity Q .

ня, кільця і циліндра. Третя група включає параметри зношування поршня, кільця і циліндра.

Зауважимо, що в прийнятій моделі для визначеної і сталої температури продування Q є функцією, головно залежною від геометричних параметрів, обертової швидкості двигуна, кількості циліндрів, параметрів зношування та впливу водню на експлуатаційні властивості конструкційних матеріалів системи ПВД:

$$Q = f(G, n, z, i), \quad (2)$$

де G – геометричні параметри системи.

Прийmemo лінійну залежність втрат робочих газів внаслідок продування:

$$Q = \alpha_z \cdot n + \beta_g, \quad (3)$$

де α_z і β_g – коефіцієнти, що враховують обертову швидкість колінвала двигуна та геометричні параметри, відповідно.

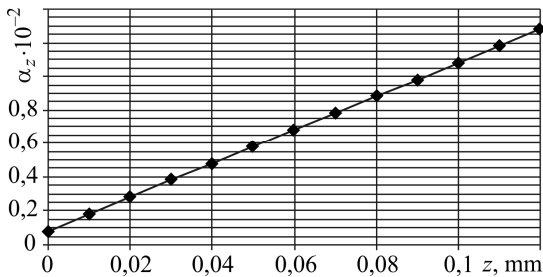


Рис. 2. Залежність коефіцієнта α_z від зношування циліндричної втулки z .

Fig. 2. Dependence of coefficient α_z on cylinder ring wear z .

Коефіцієнти α_z і β_g визначені для ряду конструкційно подібних двигунів внутрішнього згорання з СЗ. Коефіцієнт α_z (рис. 2) встановлений експериментальними дослідженнями зношування циліндричної втулки за визначеної обертової швидкості двигуна, а β_g можна вирахувати за формулою

$$\beta_g = s \cdot i \cdot \ln(i^3) \cdot \sqrt[4]{D_0} \cdot 10^2 / \sqrt[3]{l_i}. \quad (4)$$

Залежність інтенсивності продування газів за розгінної швидкості двигуна від температури навколишнього середовища є лінійною (рис. 3).

Експериментальну залежність (рис. 4) вимірів у двигуні Mercedes-Benz OM 616.917 порівняно з отриманою теоретично.

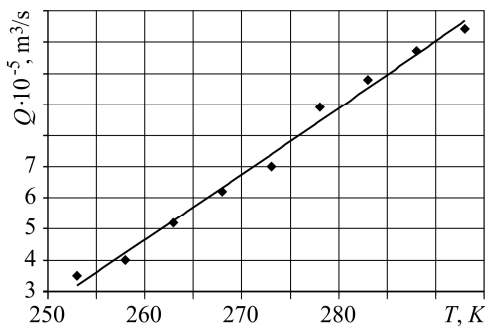


Рис. 3. Fig. 3.

Рис. 3. Залежність інтенсивності продування газів за розгінної швидкості двигуна від температури навколишнього середовища [1].

Fig. 3. Intensity of gas blow-out at the engine starting speed as a function of the ambient temperature [1].

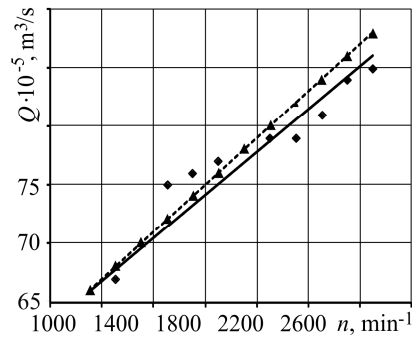


Рис. 4. Fig. 4.

Рис. 4. Інтенсивність продувань залежно від обертової швидкості двигуна Mercedes-Benz OM 646.962, визначена експериментально (суцільна лінія) та на основі формули (3) (пунктирна) за середнього зношування втулки $z = 0,05$ mm.

Fig. 4. Intensity of blow-out depending on the Mercedes-Benz OM 646.962 engine speed; established experimentally (solid line) and based by Eq. (3) (dashed line) average cylinder liner wear $z = 0.05$ mm.

Наведена модель втрат робочих газів враховує прогнозування інтенсивності продувань на підставі основних параметрів двигуна (діаметра циліндра, кількості кілець та циліндрів, кроку поршня), зношування в системі ПВЦ за дії воденьвмісних середовищ, а також впливу обертової швидкості колінвала двигуна. Для нових двигунів виявлені різниці в інтенсивності продувань в середньому до 35% через відмінності розмірів поршня, кільця і внутрішньої поверхні циліндра, а також температуру навколишнього середовища.

Визначити універсальні параметри для прогнозування інтенсивності продувань для конструкційно різних двигунів важко, бо конструкція замка кільця спричиняє зміну інтенсивності продувань навіть на 30%. Для різних двигунів кількість ущільнювальних кілець також не впливає однозначно на інтенсивність продувань. В деяких випадках одне ущільнювальне кільце призводить до стиснення робочого об'єму на 40%, а в інших не досягає і 20%. Зауважено також, що для більшості двигунів ущільнювальне кільце слабо впливає на інтенсивність продувань, але існують конструкції, де воно доущільнює робочий простір до 10...15%. Тому вдосконалення математичної моделі через доповнення коефіцієнтами, що враховують зміни параметрів, пов'язаних з впливом конструкції і водневого зношування в системі ПВЦ, має практичне значення.

ВИСНОВКИ

Запропонована модель втрат робочих газів дозволяє виявити різницю в інтенсивності продувань в середньому до 35%. Вдосконалення цієї моделі через доповнення коефіцієнтами, що враховують зміни параметрів, пов'язаних з впливом конструкції і водневого зношування в системі ПВЦ, має практичне значення під час розробки сучасних двопаливних двигунів внутрішнього згорання.

РЕЗЮМЕ. Предложена модель потерь рабочих газов, учитывающая прогнозирование интенсивности продувок на основании основных параметров двигателя (диаметра цилиндра, количества колец и цилиндров, шага поршня), изнашивания системы поршень-втулка-цилиндр при действии водородсодержащих сред, а также влияние оборотной скорости коленвала двигателя, и позволяющая обнаружить разницу интенсивности продувок в среднем до 35%.

SUMMARY. The model of service gases losses which considers the prediction of blow-out intensity, based on the basic geometric engine parameters, such as diameter of the cylinder, number of rings, number of cylinders, piston stroke, wear of the piston-ring-cylinder system, and the impact of the engine crankshaft speed, is proposed. It was observed that even new brands of engines demonstrate differences in the blow-out intensity. These differences may reach up to 35%, which is due to deviations in the dimensions of pistons, rings and cylinder bearing surface.

1. *Abramek K. F.* Experimental examination of load losses in the form of exhaust gas scavenging into crankcase // *Combustion Engines*. – 2009. – № 1. – P. 95–99.
2. *Abramek K. F., Stoek T., and Osipowicz T.* Statistical evaluation of the corrosive wear of fuel injector elements used in common rail systems // *J. of Mech. Engng.* – 2015. – **61**. – P. 91–98.
3. *Балицький О. І., Абрамек К. Ф.* Діагностичний параметр зношування системи поршень-втулка-циліндр // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2013. – **49**, № 2. – С. 89–91. (*Balyts'kyi O. I. and Abramek K. F.* Diagnostic parameter of wear of a piston-bush-cylinder system // *Materials Science*. – 2013. – **49**, № 2. – P. 234–236.)
4. *Діагностування деградації замка ущільнювального кільця за втратою робочих газів двигуна внутрішнього згорання / О. І. Балицький, К. Ф. Абрамек, Т. Штек, Т. Осіпович // Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2014. – **50**, № 1. – С. 142–144. (*Balyts'kyi O. I., Abramek K. F., Shtoeck T., and Osipowicz T.* Diagnostics of degradation of the lock of a sealing ring according to the loss of working gases of an internal combustion engine // *Materials Science*. – 2014. – **50**, № 1. – P. 156–159.)
5. *Stoek T., Osipowicz T., and Abramek K. F.* Methodology for the repair of Denso common rail solenoid injectors // *Maintenance and Reliability*. – **16**, № 2. – 2014. – P. 259–264.

Одержано 18.01.2016

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРІВ

Міжнародний двомісячний журнал “Фізико-хімічна механіка матеріалів”, який перевидає англійською мовою видавництво Springer Verlag під назвою “Materials Science”, друкує результати досліджень та оглядові праці у галузі міцності та довговічності конструкційних матеріалів, охоплюючи механіку руйнування, зокрема з урахуванням робочих умов, та суміжні ділянки матеріалознавства, фізики і хімії. Окремі рубрики присвячені зміцнювальним технологіям, методам захисту від корозії (інгібітори, покриття тощо), інженерії поверхонь і оптимізації структури, а також діагностиці та неруйнівному контролю елементів конструкцій.

Журнал публікує статті українською, російською та англійською мовами.

Вимоги до оформлення статті

1. Назву статті (**не більше двох рядків**) слід подати трьома мовами.
2. Обсяг статей (крім оглядових) разом з таблицями, рисунками та підписами до них і списком літератури не повинен перевищувати 12 тис. знаків (6 сторінок) шрифтом Times New Roman 10,5п з полуторним інтервалом.

3. Стаття повинна містити **ключові слова**, стислий виклад стану проблеми, опис предмета, мети і методу досліджень, результати та їх обговорення, висновки, за винятком коротких повідомлень обсягом не більше трьох сторінок.

4. **Резюме англійською, українською та російською мовами** до 20 рядків повинні містити **конкретні результати** і починатися словами “отримано...”, “показано...”.

5. На рисунках не повинно бути словесних позначень. У тексті статті вказують місце рисунка. **Підписи пишуть мовою оригіналу та англійською**. Англійський підпис мусить повністю пояснити, що зображено на рисунку. Рисунки, по змозі, роблять однакових розмірів, а їх ширина не має перевищувати 6 см. Подібні рисунки об’єднують у групи (Рис. *Xa, b, c, ...*). Рисунки, які у статті не аналізують і не використовують для наукових висновків, не поміщати. Не можна дублювати ті самі дані в таблицях, графіках і тексті статті, а також підписи під рисунками у тексті.

6. Для позначення величин вживати літери тільки латинської та грецької абеток. Всі символи треба пояснити в тексті. Не застосовувати індекси у вигляді початкових літер якогось слова, а замінити їх на цифри (наприклад, a_0 замість $a_{\text{поч.}}$). Номер формули вказують, якщо **на ній далі є посилання**.

7. Фізичні величини подають в одиницях СІ, користуючись міжнародними позначеннями.

8. Цитовану літературу треба обмежити тільки найважливішими працями. Список літератури подають у порядку посилання в статті **мовою оригіналу** (можна дублювати англійською мовою), як указано нижче.

Мазурак Л. П., Бережницький Л. Т., Качур П. С. Пружна рівновага ізотропних тіл із криволінійними вклученнями // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – № 6. – С. 21–31.

Ang H. E. and Gao Y. L. Strength prediction of unidirectional composites with a circular hole // Int. J. of Fracture. – 1992. – **56**, № 2. – Р. 23–29. (*Для журнальних статей*).

Кортен Х. Т. Механіка розрушення композитов // Разрушение / Под ред. Г. Либовица. – М.: Мир, 1976. – Т. 5. – С. 367–471.

Speidel H. J. C., Uggowitzer P. J. and Speidel M. O. Properties of cold worked high-nitrogen chromium based alloys // 5th Int. Conf. on High Nitrogen Steels (Espoo, Finland, May, 24–26, 1998). – Stockholm, Sweden, 1998. – Р. 124. (*Для статей у збірнику*).

Похмурський В. І., Федоров В. В. Вплив водню на дифузійні процеси в металах. – Львів: Вид. ФМІ НАН України, 1998. – 208 с. (*Для монографій*).

9. Обсяг огляду та літературу до нього можна збільшити залежно від тематики та інформативності.

Разом із двома видруками в редакцію подають комп’ютерну версію статті, підготовлену в редакторі Word for Windows 2003 або XP, та рисунки у форматах *.tif або *.cdr (лише в чорно-білому виконанні). Статтю передають на CD диску або Е-поштою: pcmm@ipm.lviv.ua (надсилати як attachment).

10. До статей додають дані про авторів (ПІБ повністю (трьома мовами), № телефону, Е-пошту), а також назву й адресу установи, в якій виконано роботу, і вказують контактну особу.

Статті, не оформлені за цими правилами, редакція не розглядатиме.

Докладнішу інформацію можна отримати телефоном: (032) 263-73-74.

E-mail: pcmm@ipm.lviv.ua