Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, No 3, 31-37
ISSN 2663-1334 (print), ISSN 2663-1342 (online), www.journals.nubip.edu.ua/index.php/Tekhnica

DOI: 10.31548/machenergy.2019.03.031-037

УДК 631.354.2

УТОЧНЕННЯ РЕЖИМУ ПРОКРУТКИ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВОЇ ГРУПИ ДВИГУНІВ МАШИН ДЛЯ ЛІСОТЕХНІЧНИХ МАШИН

Л. Л. Тітова, О. В. Надточій

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Стаття з спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.

Кореспонденція авторів: titovall@ukr.net.

Історія статті: отримано – квітень 2019, акцептовано – серпень 2019.
Бібл. 10, рис. 6, табл. 1.

Анотація. У статті проведено аналіз методів діагностування циліндро-поршневої групи (ЦПГ) двигунів внутрішнього згоряння. Запропонований уточнений спосіб діагностування, об'єднуючий в собі всі позитивні сторони існуючих методів і вирішує задачу підвищення достовірності оцінки технічного стану вузлів і механізмів ДВЗ. Розроблена математична модель, яка враховує частоту прокручування, зазори, фази процесу зміни тиску, яка дозволяє отримати залежності зміни тиску в камері згоряння. Виявлена певна закономірність зниження тиску у кінці такту стиснення з ростом величини зношення циліндрів, кілець, поршня, яка впливає на технічний стан циліндро-поршневої групи. Представлені графіки залежностей між розглянутими параметрами моделювання.

Ключові слова: циліндро-поршнева група, діагностування, частота обертання, компресія, осцилограма тиску, режими, параметри.

Постановка проблеми

Аналіз надійності систем ДВЗ показує, що найчастіше відмови виникають у системах запалювання та електрообладнання – 21-45%, другою за значимістю система живлення – 18-30%, третє місце посідають – відмови механізмів двигуна - 10-38% [1-9].

Зважаючи на таку частоту відмов, діагностування цих систем не викликає сумнівів і є досить актуальним.

Наприклад, на частку циліндро-поршневої групи (ЦПГ) припадає до 10-15% відмов двигуна [10]. Відомо, що режим прокрутки під час пуску двигуна щільно корегується з граничним станом ЦПГ [7-9].

Аналіз останніх досліджень

Відомий метод для діагностування ЦПГ, що базується на газовому витратомірі ГОСНИТИ (рис. 1, *а*). Його використання в експлуатації є занадто трудомістким та вимагає чіткого дотримання процесу, тому будь-яке недотримання призводить до відхилення показників, та помилкових діагнозів. Існуючий паралельно газовий лічильник і реометр рідинний також не позбавлені подібних недоліків що і газовий витратомір. Та і виявився для умов експлуатації занадто складним.

Популярним у сервісі є використання компресиметра (рис. 1, *в*). Основним недоліком якого є те, що через малий вхідний отвір все повітря не встигає пройти в манометр за один хід поршня. Для тому стабілізації показань манометра необхідне тривале прокручування колінчастого валу двигуна. Самі ж показання компресії є малодостовірними, із-за прямої залежності тиску в кінці стиснення від частоти обертання колінчастого валу. При стартерному пуску складно домогтися сталості цієї частоти. Ще існує залежність частоти від стану акумуляторної батареї.

Зношення розподільного валу чи неправильне його розташування, нагар у камері згоряння також призводять до невірних показань величини тиску.

Достовірність оцінки технічного стану за допомогою стетоскопа напряму пов'язане із кваліфікацією діагноста. Застосування стетоскопів, фонендоскопів і шумомірів розширює можливості контролю технічного стану, проте не дозволяє провести об'єктивну оцінку, бо ці прилади лише підсилюють шум і стукіт, не впливаючи на суб'єктивний фактор.

Відомий метод продування циліндрів стисненим повітрям при використанні приладу К-69М (рис. 1, *б*). Суттєвим недоліком використання даного приладу є необхідність встановлювати поршень в певному положенні (на початок стиснення, у ВМТ, тощо). Іноді це досить складно зробити на сучасних автомобілях, які не містять на двигуні допоміжних рисок. Іншою перешкодою є обладнання автомобілів автоматичною, що так само ускладнює роботу. Сам пристрій не фіксує зношення лабіринтового ущільнення в з'єднанні поршень кільце.

Подальшим розвитком приладу К-69М є пневмотестер К-272 (рис. 1, *г*), призначенням якого є визначення щільності контуру горіння. Метод

тестування базується на величині падіння тиску стисненого повітря, що подається в циліндр через свічковий отвір. Головною перевагою порівняно з компресометром є діагностування на нерухомому двигуні. Тиск на вхід подається компресором і контролюється вхідним манометром. Прилад має ряд переваг у порівнянні з К-69М: менша в 6 разів маса і габаритні розміри, універсальність (діагностування карбюраторних і дизельних двигунів (для прикладу КамАЗ і СМД, ЯМЗ). Проте залишилась необхідність встановлення поршня в певне положення, що вимагає багато підготовчих робіт.

Рис. 1. Засоби діагностування ЦПГ ДВС: *а* – газовий витратомір ГОСНИТИ; *б* – К-69М; *в* – компресиметр; *г* – пневмотестер К-272.

Fig. 1. Diagnostic tools CPG ICE: a – gas flowmeter ISO; б – К-69М; в – kompressor; г – pneumotester К-272.

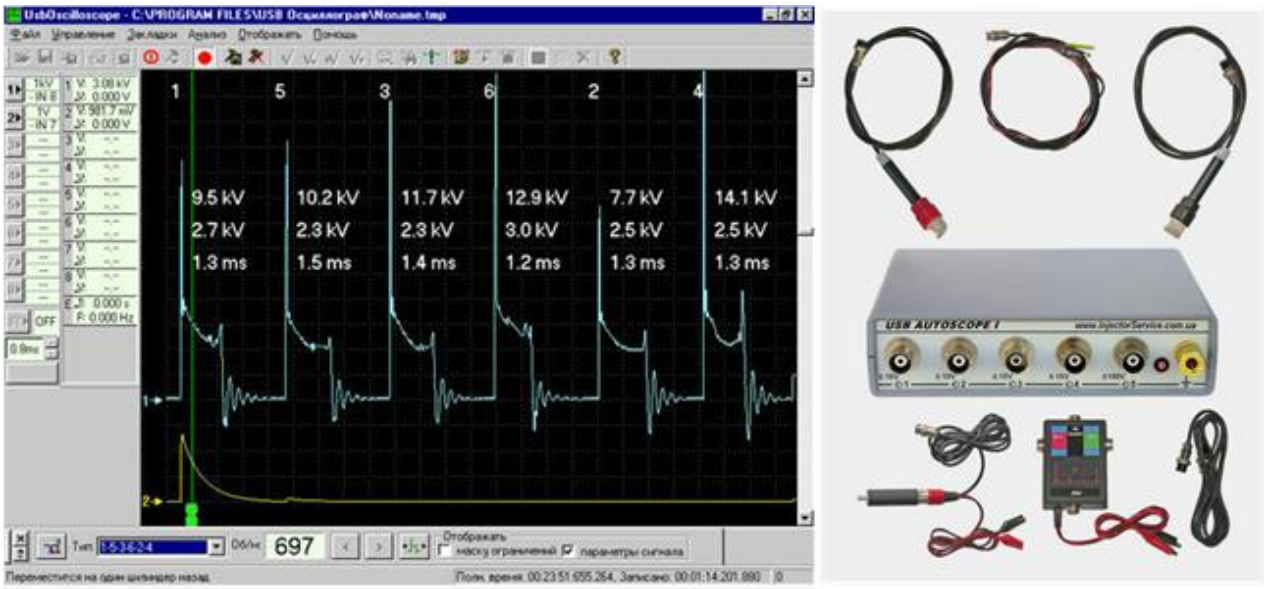

Рис. 2. Робоче вікно та комплект осцилографа Постоловського USB-Autoscope.

Fig. 2. Window and oscilloscope kit Postolovskogo USB-Autoscope.

Поширений також метод відносної оцінки зношення ЦПГ, заснований на послідовному відключенні циліндрів по одному і контролю зниження частоти обертання. Цей метод визначає відносну, а не абсолютну, оцінку і є даремним, при рівному зношені всіх циліндрів.

Метод діагностування за струмом живлення стартера - має низьку достовірність через вплив на цей показник технічного стану стартера і акумуляторної батареї.

Метод визначення стану окремих циліндрів за величиною розрідження - надто трудомісткий в застосуванні. За отриманими показаннями неможливо розділити зношення окремих елементів ЦПГ.

Відомий також метод, що базується на вимірюванні кількості повітря, яке проривається через нещільності камери згоряння при холостому ході із використанням осцилографа Постоловського – модель USB-Autoscope (рис. 2). Стандартній технології діагностування властивий недолік - неправильний режим (за достовірністю і точністю). За стандартною методикою осцилографом USB-Autoscope знімають покази лише на холостому ходу, на якому проявляються не всі несправності, а достовірність цього методу, залежить від правильності математичної моделі (скрипту обробітку). Додатковими недоліками є витоки повітря, що проходять через газорозподільний механізм, які не враховуються. Ці недоліки призводять до низької достовірності методу та стримують його використання.

У нашій роботі передбачалося використання діагностичного стенду «Дельфін-1М» (рис. 3), робота якого схожа на USB-Autoscope, однак має більшу функціональність. При цьому чутливість і точність методу підвищена за рахунок використання режиму прокручування колінчастого валу двигуна стартером

Мета досліджень

Мета досліджень – аналіз існуючих основних методів та розробка уточненої моделі для діагностування ЦПГ в режимі прокручування колінчатого валу ДВЗ з метою підвищення ефективності діагностування.

Результати досліджень

Головною метою моделювання було обґрунтування впливу різних чинників на стиснення робочої суміші в надпоршневому просторі при обертах, які відповідають прокручуванню двигуна стартером. Розглядався процес вимірювання тиску у функції кута повороту колінчастого валу поршневого бензинового двигуна. Припускалися, що процес стиснення в циліндрі адіабатний (без взаємодії з навколишнім середовищем). Якщо система знаходиться в стані термодинамічної рівноваги, то без зовнішніх впливів вийти з цього стану не зможе [3-6].

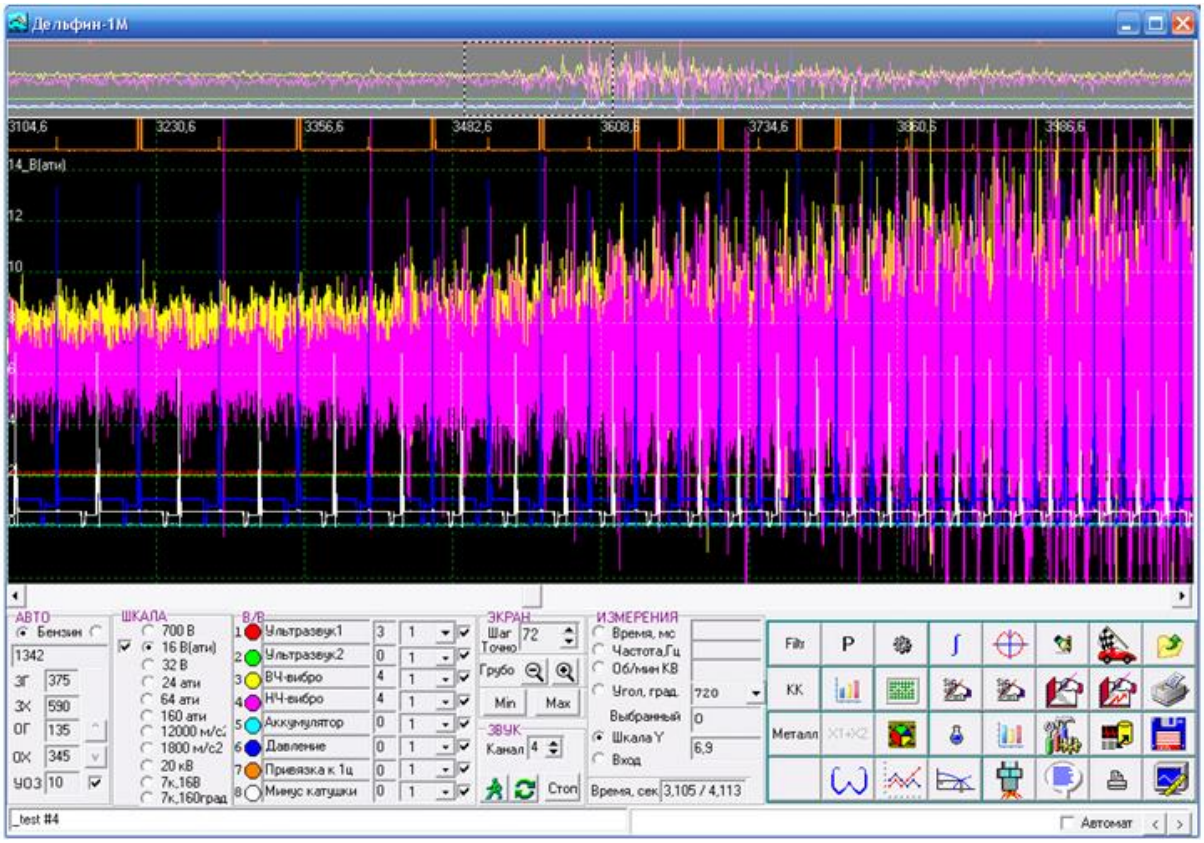

Рис. 3. Робоче вікно стенду Дельфін-1М.
Fig. 3. Stand work window Delphin-1M.

У нерівноважному процесі різні частини системи мають неоднакові температури, тиску, тощо. Адіабатний процес буде відповідати рівнянню стану ідеального газу Менделєєва-Клапейрона [1].

$$PV = \mu \cdot R \cdot T \tag{1}$$

де P – тиск, Па; V – об'єм, мм^3; μ – молярна маса речовини; R - газова постійна, Дж/кг; T – температура, К^o.

За об'єкт дослідження було вибрано двигун ЯМЗ. Відзначимо, що за інформацією AUTO-Consulting, багато років даний двигун був лідером продажів в комерційному сегменті України. На сьогодні за 25 років в Україні накопичилось близько 19 тис. двигунів цієї марки в різних модифікаціях.

Для проведення розрахунків циліндра двигуна маємо наступні вихідні характеристики (табл. 1).

Таблиця 1. Вхідні дані розрахунку циліндра.
Table 1. Input data of calculation of cylinder.

Хід поршня, мм	86	
Діаметр циліндра, мм	92	
Радіус кривошипа, мм	R_{KR}	43
Ступінь стиснення	ε	9,3
Молярна маса, кг/моль	μ	28,96
Газова стала, Дж/кг	R	287
Щільність повітря, кг/м^3	ρ_P	1293

Використаємо формулу Менделєєва-Клапейрона для циліндра двигуна, взявши значення початкового тиску в один бар. У двигуна циліндр лишається з'єднаним з атмосферою при повороті колінчастого валу від нижньої мертвої точки (Н.М.Т) до кута в 46° (для ЯМЗ-236 відповідно 52°) і зміна об'єму не впливає на зміну тиску.

Залежно від кута поворота колінчатого валу хід поршня від Н.М.Т до В.М.Т описується наступним рівнянням (дані з табл. 1):

$$s = R_{KR}\left((1-\cos\varphi)+\frac{\lambda}{4}\cdot(1-\cos 2\varphi)\right) \tag{2}$$

де φ – кут повороту колінчатого валу, рад; λ – відношення радіусу кривошипа до довжини шатуна ($\lambda = 0.2721$).

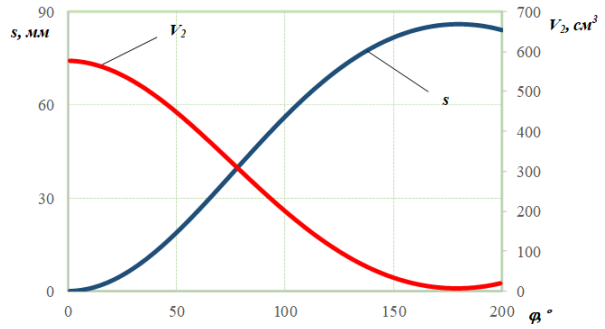

Рис.4. Залежність ходу поршня ***s*** та об'єму надпоршневого простору ***V₂*** від кута повороту ***φ*** колінчатого валу.

Fig. 4. The dependence of the piston stroke s and the volume of the piston space V_2 on the angle of rotation φ of the crankshaft.

Зміна тиску в циліндрі залежно від зміни об'єму надпоршневого простору знаходимо за залежністю:

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k \tag{3}$$

де P_1 – тиск на початку такту стиснення, Па; k – показник адіабати, для повітря (k = 1,4); V_1 і V_2 – об'єм надпоршневого простору в початковий момент стиснення і наступні за кутом повороту колінчатого валу.

$$V_2 = (V_R + V_{KZ}) - s \cdot S_P, \text{ мм}^3 \tag{4}$$

де V_R *і* V_{KZ} – робочий та об'єм камери згорання циліндра; S_p – площа поршня, мм^2.

Для визначення обсягу повітря, яке просочується через зазори ЦПГ, слід визначити швидкість його витікання. Яка ця швидкість: менша за критичну чи більша-рівна критичній? Для цього необхідно знайти показник β:

$$\beta = \frac{P_A}{P_C} \tag{5}$$

де P_A – атмосферний тиск, Па; P_C – тиск в циліндрі, Па.

Для двохатомного газу β_{CR} = 0,528. За умови, що $\beta > \beta_{CR}$, витоки здійснюються з до критичною швидкістю і обчислюється за формулою [1]:

$$\omega = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot RT_C \left(1 - \left(\frac{P_A}{P_C}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)} \tag{6}$$

При $\beta < \beta_{CR}$, витікання відбувається з критичною швидкістю і визначається за формулою:

$$\omega_{CR} = \sqrt{2\frac{k}{k-1}RT_C} \tag{7}$$

Обсяг повітря, що просочилося крізь зазори в ЦПГ для сектору повороту колінчастого валу рівному 1° визначимо за формулою:

$$\Delta V = \frac{F\omega \cdot 10^3}{6 \cdot n}, \tag{8}$$

де F - площа зазору в ЦПГ, що утворився в результаті зносу, мм^2.

Приймемо, що в результаті витоку відбувається адіабатне розширення повітря в циліндрі на величину ΔV, тоді тиск в результаті розширення повітря P_4 визначимо за рівнянням:

$$P_4 = P_3 \cdot \left(\frac{V_2}{V_2 + \Delta V}\right)^k \tag{9}$$

де P_3 – тиск в циліндрі двигуна із врахуванням передачу тепла стінкам циліндра, Па.

Удосконалена математична модель, із урахуванням частоти прокручування, витоків повітря в зазорах та кількості теплоти, дозволяє моделювати зміну тиску в камері згоряння, як наслідок підвищити

точність вибору оптимальних режимів діагностування.

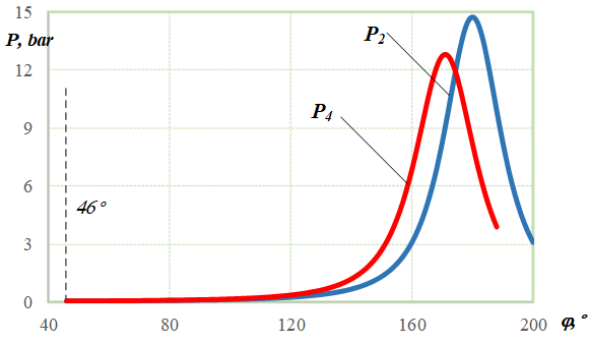

Рис. 5. Залежності тиску в камері згорання P_2 та тиску з врахуванням розширення P_4 від кута повороту колінчатого валу.

Fig. 5. The pressure dependence of the combustion chamber P_2 and the pressure taking into account the expansion P_4.

В результаті моделювання отримано залежність тиску, в кінці такту стиснення, від частоти обертання колінчастого валу двигуна при зносі кілець поршня (рис. 6).

Графік свідчить, що з ростом величини зносу кілець тиск в кінці такту стиснення знижується.

Причому, при великих зношеннях спостерігається динаміка істотної зміни тиску в кінці такту стиснення.

Так, при витоках рівнозначних витокам крізь отвір перетином 1,5 мм - лінія P(1,5) і при прокручуванні 100 об/хв тиск дорівнює 6 бар, а при 300 об/хв - 12 бар, тоді як при перетині 0,1 мм - лінія P(0) на всьому протязі зміни обертання від 100 до 300 об/хв тиск тримається на рівні 16-17 бар.

В результаті проведених розрахунків з моделюванням витоку повітря через спрацьовані кільця з різним технічним станом циліндрів отримана залежність (рис. 6). Характер зміни тиску кінця такту стиснення при збільшенні обертів аналогічна для різного стану зношення циліндрів, однак при більшому зношенню кілець змінюється також і фаза тиску, і чим більше зношення кільця, тим сильніше зміщення фази.

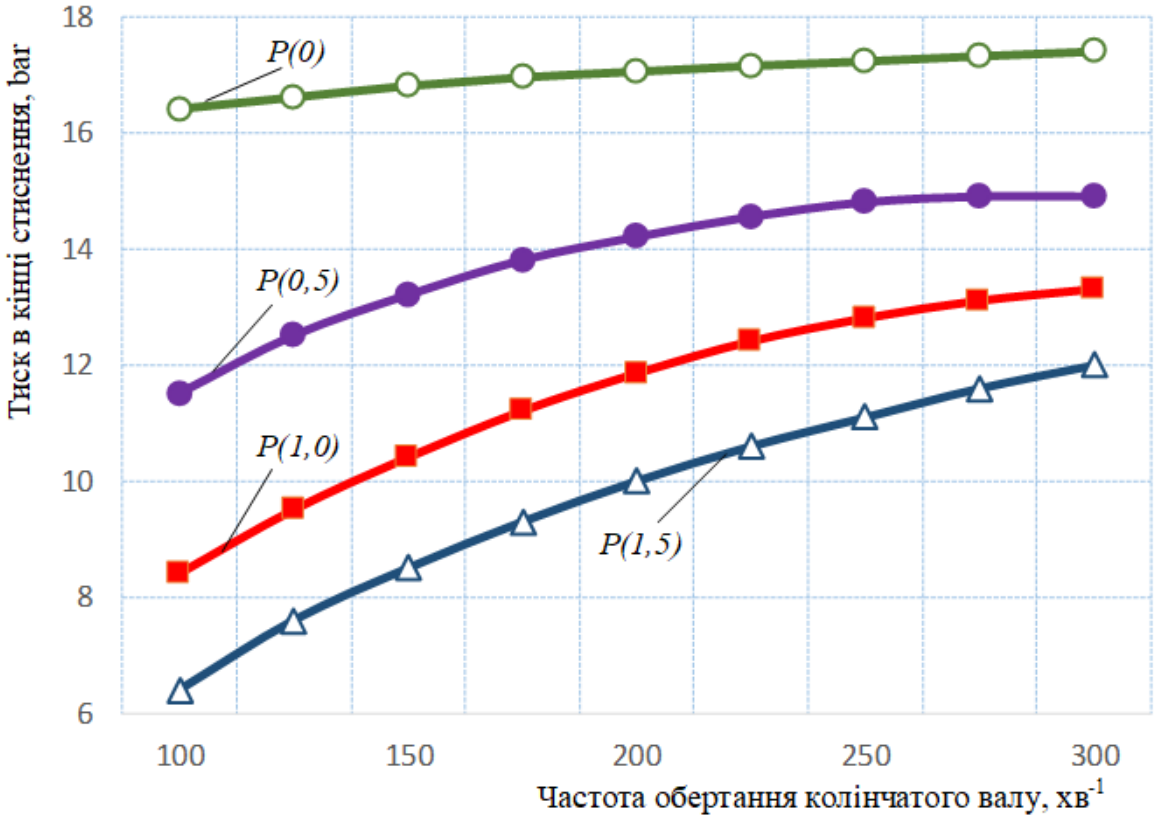

Рис. 6. Залежність зміни тиску (бар) в кінці такту стиснення при зношенні циліндрів; лінії P(0), P(0,5), P(1,0), P(1,5) - значення сумарних еквівалентних перетинів витоків повітря, відповідно, (мм): 0,1; 0,5; 1,0; 1,5.

Fig. 6. Dependence of change of pressure (bar) at the end of the compression stroke during cylinder wear; lines P (0), P (0,5), P (1,0), P (1,5) values of the total equivalent crossings of air leaks, respectively, (mm): 0,1; 0.5; 1.0; 1.5.

Висновки

1. Оцінка технічного стану ЦПГ за удосконаленою методикою для різних умов діагностування підтвердила, що з ростом величини зносу кілець також знижується і тиск в кінці такту стиснення. Причому, при великих зношеннях (близьких до граничних) тиск кінця такту стиснення змінюється істотніше. Розроблений метод дозволяє об’єднати в собі всі позитивні сторони існуючих та запропонованих методів і вирішити задачу підвищення достовірності оцінки технічного стану

вузлів і механізмів ДВЗ. Проведене моделювання для різного технічного стану циліндрів і різним зношенням кілець показав аналогічний характер зміни тиску в кінці такту стиснення, виявивши значні зміни фаз тиску, а це потребує коригування фази подачі запалювання для покращення пускових характеристик ДВЗ.

2. Витрата повітря з надпоршневого простору пропорційна ступеню зношення (зазору) в сполученні циліндр-поршень. Відсутність зношення вгорі сполучення, призводить до відсутності зміщення фази максимального тиску. Це свідчить, що зміщення фази є наслідком зношення сполучення, лише у верхній частині ЦПГ. Тобто діагностичний параметр зміщення фази максимального тиску слід використовувати, тільки для оцінки ступеню зношення ЦПГ у верхній частині сполучення. Однак цей показник є важливим для процесу запуску двигуна, бо характеризує момент досягнення максимальної температури паливно-повітряної суміші.

Список літератури

1. *Дьяченко В. Г.* Теория двигателей внутреннего сгорания: учеб. для вузов. Харьков: ХНАДУ, 2009. 340 с.

2. *Иванов Р. В.* Диагностирование ДВС по параметру мощности механических потерь: автореф. дис. Канд. техн. наук. Волгоград, 2010. 40 с.

3. *Ждановский Н. С.* Термодинамический анализ параметров конца сжатия при пуске дизеля. Энергомашиностроение. 2017. №8. С. 18-19.

4. *Дробышевский Ч. В., Боровиков В. Ф., Фахрутдинов А. Г., Лазурко В. П.* Оценка термодинамических параметров заряда на пусковых режимах и возможности пуска. Двигателестроение. 2019. №11. С. 9-10.

5. *Болдырев И. В.* Математическая модель пуска двигателя. Двигателестроение. 2014. №6. С. 14-16.

6. *Сараева И. Ю.* Исследование закона распределения случайной величины компрессии // Автомобильный транспорт. 2011. №29. С. 199-206.

7. *Суранов Г. И.* Уменьшение износа автотракторных двигателей при пуске. Москва. Колос, 2012. 143 с.

8. *Понизовский А. Ю.* Оценка технического состояния цилиндропоршневой группы автотракторных дизелей по разным расходам воздуха на впуске и выпуске в пусковом режиме: автореф. дис. Канд. техн. наук. Новосибирск, 2010. 111 с.

9. *Пичугин А. И.* Повышение эффективности диагностики цилиндро-поршневой группы автомобильных двигателей с помощью совершенствования методов и средств распознавания ее состояния. Автореф. дис. канд. техн. наук. Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова. Саратов, 2011. 23 с.

10. *Rogovskii Ivan, Titova Liudmyla, Novitskii Andriy, Rebenko Victor*. Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. Proceedings of 18th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 22-25, 2019, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 18, pp. 291-298. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N451. Scopus.

References

1 *Dyachenko V. G.* (2009). Theory of internal combustion engines: textbook. for universities. Kharkov: KHNADU, 340.

2. *Ivanov R. V.* (2010). Diagnosis of internal combustion engines by the parameter of the power of mechanical losses: abstract dis. Cand. tech. sciences. Volgograd, 40.

3. *Zhdanovsky N. S.* (2017). Thermodynamic analysis of compression end parameters at diesel start Power engineering. No. 8. 18-19.

4. *Drobyshevsky Ch. V., Borovikov V. F., Fakhrutdinov A. G., Lazurko V. P.* (2019). Evaluation of the thermodynamic parameters of the charge in starting conditions and the possibility of starting. Engine building. No. 11. 9-10.

5. *Boldyrev I. V.* (2014). Mathematical model of engine starting. Engine building. No. 6. 14-16.

6. *Saraeva I. Yu.* (2011). Investigation of the distribution law of a random value of compression. Automobile Transport. No. 29. 199-206.

7. *Suranov G. I.* (2012). Reduced wear on tractor engines during start-up. Moscow. Kolos, 143.

8. *Ponizovsky A. Yu.* (2010). Assessment of the technical condition of the cylinder-piston group of automotive diesel engines for various air flow rates at the inlet and outlet in the starting mode: abstract dis. Cand. tech. sciences. Novosibirsk, 111.

9. *Pichugin A. I.* (2011). Improving the efficiency of diagnosis of a cylinder-piston group of automobile engines by improving methods and means of recognizing its condition. Abstract. dis. Cand. tech. Sciences. Saratov State Agrarian University. N.I. Vavilova. Saratov. 23.

10. *Rogovskii Ivan, Titova Liudmyla, Novitskii Andriy, Rebenko Victor*. (2019). Research of vibroacoustic diagnostics of fuel system of engines of combine harvesters. Proceedings of 18th International Scientific Conference “Engineering for rural development”. Jelgava, Latvia, May 22-25, Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 18, 291-298. DOI: 10.22616/ERDev2019.18.N451. Scopus.

УТОЧНЕНИЕ РЕЖИМА ПРОКРУТКИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЦИЛИНДРО-ПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ ДВИГАТЕЛЕЙ МАШИН ДЛЯ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИХ РАБОТ

Л. Л. Титова, О. В. Надточий

Аннотация. В статье проведен анализ методов диагностирования цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) двигателей внутреннего сгорания. Предложенный уточненный способ диагностирования, объединяющий в себе положительные стороны существующих методов, решает задачу повышения достоверности оценки

технического состояния узлов и механизмов ДВС. Разработана математическая модель, учитывающая частоту прокрутки, зазоры, фазу процесса изменения давления, позволяет получить зависимости изменения давления в камере сгорания. Выявлена определенная закономерность снижения давления в конце такта сжатия с ростом величины износа цилиндров, колец и поршня, влияющая на техническое состояние цилиндро-поршневой группы. Представлены графики зависимостей между рассматриваемыми параметрами моделирования.

Ключевые слова: слова: цилиндро-поршневая группа, диагностирования, частота вращения, компрессия, осциллограмма давления, режимы, параметры.

FURTHER SCROLLING MODE FOR DIAGNOSING CYLINDER-PISTON GROUP OF ENGINES OF MACHINES FOR FORESTRY MACHINERY

L. L. Titova, O. V.Nadtochyi

Abstract. The article analyzes methods of diagnosing cylinder-piston group (CPG) of internal combustion engines. The specified method of diagnostics is offered, combining all the positive sides of the existing methods and solves the problem of increasing the reliability of the estimation of the technical condition of the units and mechanisms of the ICE. A mathematical model has been developed that takes into account the scroll frequency, gaps, and the phase of the pressure change process, which allows to obtain the dependencies of the pressure change in the combustion chamber. A certain pattern of pressure reduction at the end of the compression stroke with the increase of the wear value of cylinders, rings, and piston, which affects the technical condition of the cylinder-piston group, is revealed. The graphs of the dependencies between the considered modeling parameters are presented.

Key words: cylinder-piston group, diagnosis, speed, compression, pressure waveform, modes, parameters.

Л. Л. Тітова ORCID 0000-0001-7313-1253.
О. В. Надточій ORCID 0000-0002-1849-9538.