

МОЖЛИВОСТІ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ У КОНСТРУКЦІЯХ ТИПУ «ЦИЛІНДР-ПОРШЕНЬ»

О. Е. Хрулев

Міжнародне моторне бюро

***Анотація:** Розроблено універсальну термодинамічну модель для розрахунку робочого процесу систем типу «циліндр-поршень», яка поетапно описує процеси в циліндрі, враховує реальний характер процесів впуску-випуску та витoku повітря. За допомогою моделі були вирішені три різні прикладні завдання, у тому числі моделювання гідроудару при попаданні рідини в циліндр двигуна внутрішнього згоряння, моделювання динаміки руху катапультного візка при запуску безпілотного літального апарату і моделювання індикаторної діаграми двигуна під час холодного прокручування при вимірюванні компресії. Контрольне моделювання та порівняння з відомими експериментальними даними щодо осцилографії тиску в циліндрі двигуна при прокручуванні показали, що результати моделювання відповідають експериментальним даним. Це визначає можливість використання моделі при проектуванні пристроїв, що розглядаються, і діагностиці різних видів їх пошкоджень.*

***Ключові слова:** термодинамічна модель, моделювання, холодне прокручування, компресія, гідроудар, діагностика*

POSSIBILITIES OF THERMODYNAMIC MODELING FOR STUDYING PROCESSES IN STRUCTURES OF THE “CYLINDER-PISTON” TYPE

A. E. Khrulev

International Motor Bureau

***Abstract:** An universal thermodynamic model for calculating the working process of “cylinder-piston” type systems has been developed which describes step by step the processes in the cylinder, and takes into account the real nature of the intake-exhaust and air leakage processes. Using the model, three completely different applied problems were solved, including modeling the hydraulic lock when fluid enters the cylinder of an internal combustion engine, modeling the dynamics of the movement of the catapult trolley during the launch of an unmanned aerial vehicle, and modeling the engine indicator diagram during cold cranking when measuring compression. Control modeling and comparison with known experimental data on oscillography of pressure in the engine cylinder during cranking showed that the modeling results correspond to the experimental data. This determines the possible use of the model in designing devices under consideration and diagnosing various types of their damage.*

***Keywords:** thermodynamic model, modeling, cold cranking, compression, hydrolock, diagnostics*

У техніці використовується велика кількість пристроїв, заснованих на роботі поршня в циліндрі. Це не тільки поршневі двигуни різних типів, але також пневматичні системи, включаючи різні виконавчі пристрої та приводи. У загальному випадку вони можуть розглядатися зовсім різними групами наукових шкіл і дослідників, проте мають дуже близький теоретичний опис. Це дає можливість скласти якусь загальну та універсальну математичну модель, яка засто-

совується до таких абсолютно різних конструкцій. Причому цей підхід дозволяє не лише узагальнити математичний опис подібних процесів, але також виконати математичне моделювання там, де його не застосовують з тих чи інших причин (наприклад при діагностиці несправностей).

Відповідно до цього метою роботи є розробка універсальної математичної моделі системи типу «циліндр-поршень», що застосовується до різних пристроїв.

Для побудови моделі розглянемо циліндр, у якому рухається поршень (рис. 1).

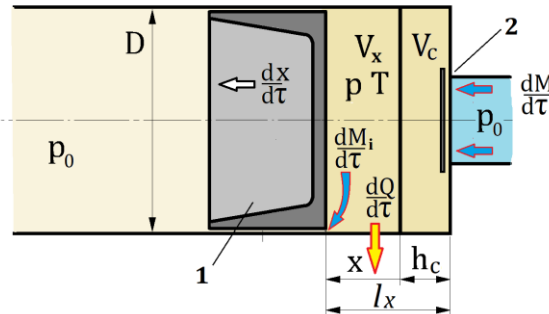


Рисунок 1 – Загальна схема досліджуваної системи «циліндр-поршень»: 1 – поршень, 2 – впускний/випускний клапан

Для виведення розрахункових рівнянь використовуємо рівняння стану ідеального газу в циліндрі:

$$p = \frac{M}{V} RT, \quad (1)$$

та рівняння 1-го закону термодинаміки [1, 2], записане для об'єму циліндра V :

$$dU = dQ - dL + idM, \quad (2)$$

У рівняннях (1) і (2): p , T – тиск та температура повітря у циліндрі, $dU = d(MC_V T)$ – зміна внутрішньої енергії повітря у циліндрі; dQ – кількість тепла, що підводиться (+) або відводиться (-); $dL = pdV$ – робота повітря; $i = C_p T$ – ентальпія повітря; dM – зміна маси M повітря в циліндрі за рахунок припливу в циліндр (+) або витоків з циліндра (-); C_V , C_p – теплоємності при постійному тиску та об'ємі, пов'язані співвідношенням $C_p = \gamma C_V = \gamma R / (\gamma - 1)$; де γ , R – показник адіабати та газова постійна повітря.

Об'єм повітря в циліндрі, очевидно, визначається площею F_p і положенням поршня, що дорівнює відстані x від верхньої мертвої точки:

$$V = V_x + V_c = V_x + \frac{V_h}{\varepsilon - 1} = V_h \left(\frac{x}{S} + \frac{1}{\varepsilon - 1} \right) = F_p (x + h_c) = F_p l_x, \quad (3)$$

де S – хід поршня; V_h , V_c – робочий та «мертвий» об'єм циліндра; $V_x = F_p x$ – поточний об'єм, що відкривається поршнем; ε – геометричний ступінь стиснення; $h_c = V_c / F_p = S / (\varepsilon - 1)$ – довжина «мертвого» об'єму (або камери згорання); $l_x = x + h_c$ – поточна робоча довжина циліндра.

Враховуючи, що зміна об'єму циліндра $dV = F_p dx$, а температура повітря за відсутності горіння змінюється незначно, з рівняння (2) при підставленні рів-

няння (1) отримаємо диференціальне рівняння для температури повітря в циліндрі [2]:

$$\frac{dT}{T} = \frac{(\gamma - 1)}{l_x} \left[-dx + \frac{RT}{pF_p} \left(dM + \frac{dQ}{RT} \right) \right]. \quad (4)$$

З іншого боку, після диференціювання рівняння стану (1) отримаємо диференціальне рівняння тиску повітря в циліндрі [2]:

$$\frac{dp}{p} = \frac{\gamma}{l_x} \left[-dx + \frac{RT}{pF_p} \left(dM + \frac{\gamma - 1}{\gamma} \frac{dQ}{RT} \right) \right]. \quad (5)$$

Якщо рівняння (4) і (5) розділити на збільшення часу $d\tau$ та знехтувати теплообміном зі стінками циліндра (наприклад, при низьких температурах процесу), можна отримати математичну модель досліджуваного процесу як систему диференціальних рівнянь 1-го порядку [3, 4]:

$$\begin{cases} \frac{dT}{d\tau} = (\gamma - 1) \psi T \\ \frac{dp}{d\tau} = \gamma \psi p \\ \psi = \frac{1}{l_x} \left(-\frac{dx}{d\tau} + \frac{RT}{pF_p} \frac{dM}{d\tau} \right). \end{cases} \quad (6)$$

Розглянемо деякі окремі випадки роботи поршня в циліндрі.

1. Присутність у циліндрі рідини, що займає відносний об'єм $\varepsilon_v = v/V_c$ «мертвого» простору циліндра, дає наступний запис формули (3):

$$V = V_h \left(\frac{x}{S} + \frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon - 1} \right) = F_p [x + h_c(1 - \varepsilon_v)], \quad (7)$$

звідки робоча довжина циліндра, що входить у систему рівнянь (6) $l_x = x + h_c(1 - \varepsilon_v)$.

2. Наявність ресивера, форкамери або будь-якого іншого додатково приєднаного до циліндра об'єму V_R дозволяє записати (3) у вигляді:

$$V = V_R + V_h \left(\frac{x}{S} + \frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon - 1} \right) = V_R + F_p [x + h_c(1 - \varepsilon_v)], \quad (8)$$

звідки робоча довжина циліндра, що входить у систему рівнянь (6), становитиме у загальному випадку:

$$l_x = V_R/F_p + x + h_c(1 - \varepsilon_v). \quad (9)$$

Для практичного застосування моделі необхідно деталізувати модель, визначивши закони зміни координати поршня x і витрати повітря $dM/d\tau$, що надходить або витікає з циліндра.

Для кривошипно-шатунного механізму відповідно до рис. 2, а координата x може бути виражена формулою:

$$x = \frac{S}{2} \left(1 + r - \cos \phi - \sqrt{r^2 - \sin^2 \phi} \right), \quad (10)$$

де $r = 2L_c/S$ – відносна довжина шатуна.

Диференціювання рівняння (10) дає прискорення поршня, що входить до системи рівнянь (6):

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{\pi S n}{60} \sin \phi \left(1 + \frac{\cos \phi}{\sqrt{r^2 - \sin^2 \phi}} \right) = v_m \frac{\pi}{2} \sin \phi \left(1 + \frac{\cos \phi}{\sqrt{r^2 - \sin^2 \phi}} \right), \quad (11)$$

де $C_m = S n / 30$ – середня швидкість поршня.

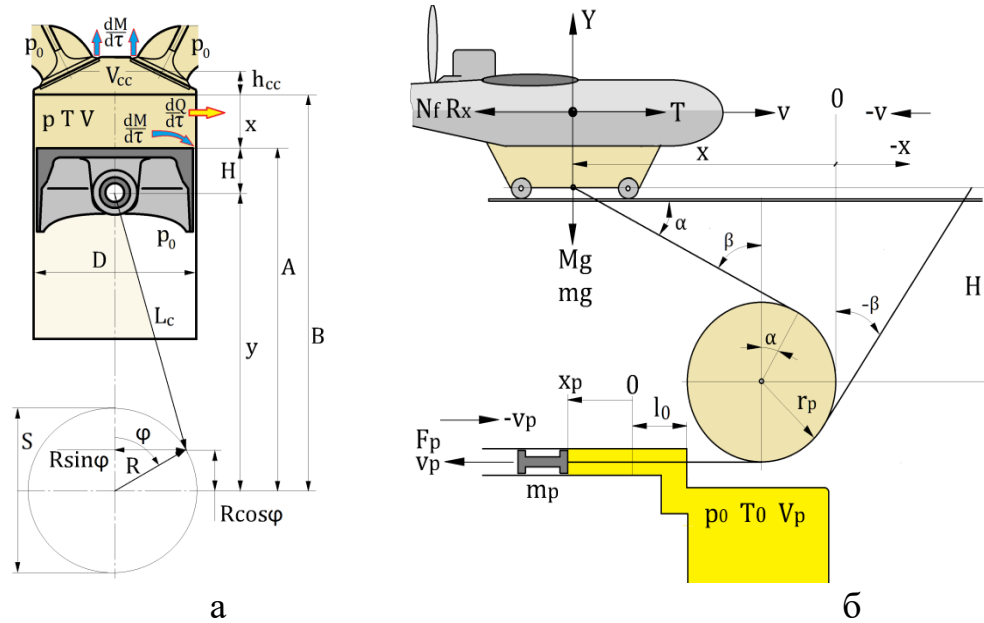


Рисунок 2 – Приклади законів руху поршня: а – кривошипно-шатунний механізм двигуна; б – поліспастиний механізм пневматичної катапульти

Для поліспастного механізму катапультичної системи переміщення поршня (рис. 2, б) визначається положенням візка та довжиною троса [4, 5]:

$$x_p = L_c - \frac{H - r \sin \beta}{\sin \alpha} - \frac{\pi r (90^\circ + \beta)}{180} - l_0 - r. \quad (12)$$

Швидкості візка v і поршня v_p пов'язані співвідношенням $v_p = v \sin \beta$, а кут між напрямком руху поршня та візка:

$$\beta = \arctg \frac{1}{H} \left[x + r \left(\sqrt{1 + \left(\frac{x}{H} \right)^2} - 1 \right) \right].$$

При цьому для визначення швидкості до системи рівнянь (6) необхідно додати ще одне рівняння для прискорення візка:

$$\frac{dv}{d\tau} = \frac{F_{px} + T - R_x - F_f - F_{gx}}{M_\Sigma}. \quad (13)$$

де $M_\Sigma = M + m$ – загальна маса системи, що розганяється; M , m – маса літального апарату, маса візка та пов'язаного з ним троса; F_{px} – проекція на вісь x сили тяги троса, що визначається тиском у циліндрі p ; T , R_x – тяга двигуна та сила аеродинамічного опору апарату та візка; F_f , F_{gx} – сила тертя та проекція на вісь x сили тяжіння (якщо катапульта має кут підйому).

Зміна маси повітря в циліндрі визначається витратою повітря через клапани та місця витікання. При тиску в циліндрі вище ніж атмосферний, витрата повітря з циліндра через деякий отвір (зазор, щілина) визначається за відомою формулою [4, 5]:

$$\frac{dM_i}{d\tau} = -\mu \frac{\rho f_i}{\sqrt{RT}} \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]}, \quad (14)$$

де μ – коефіцієнт витрати; f_i – площа перерізу, через який відбувається подавання або витікання (для циліндра двигуна, крім площі витікання, необхідно задати закон відкриття клапанів по куту повороту колінчастого валу); p_0 – тиск навколишнього середовища або тиск у прилеглих до циліндра каналах.

Таким чином, при використанні формул (9) – (14) система рівнянь (6) є математичною моделлю і може бути вирішена чисельно з початковими умовами: при $\tau = 0$ $\phi = 0$, $x = 0$, $T = T_0$, $p = p_0$. Для вирішення можна використовувати простий або модифікований метод Ейлера (метод Рунге-Кутта 2-го порядку) [3, 4].

За допомогою розробленої моделі вирішувалися три абсолютно різні прикладні завдання, у тому числі:

1. Моделювання гідроудару на час вступу рідини в циліндр двигуна внутрішнього згорання. Моделювався процес стиснення з різним наповненням камери згорання рідиною з метою визначення умов втрати стійкості стрижня шатуна (рис. 3).

2. Моделювання динаміки руху візка під час роботи катапульти при старті безпілотного літального апарату (БПЛА). В результаті отримано діаграми швидкостей (рис. 4, а), прискорень та зусиль у цій системі, а також визначено вплив різних факторів на ефективність її роботи (рис. 4, б).

3. Моделювання індикаторної діаграми двигуна під час холодного прокручування при вимірюванні компресії. Розрахунки виконані для різних видів пошкоджень циліндро-поршневої та клапанної групи (рис. 5, а), отримано хорошу відповідність розрахункових даних з раніше проведеними тестами (рис. 5, б та в).

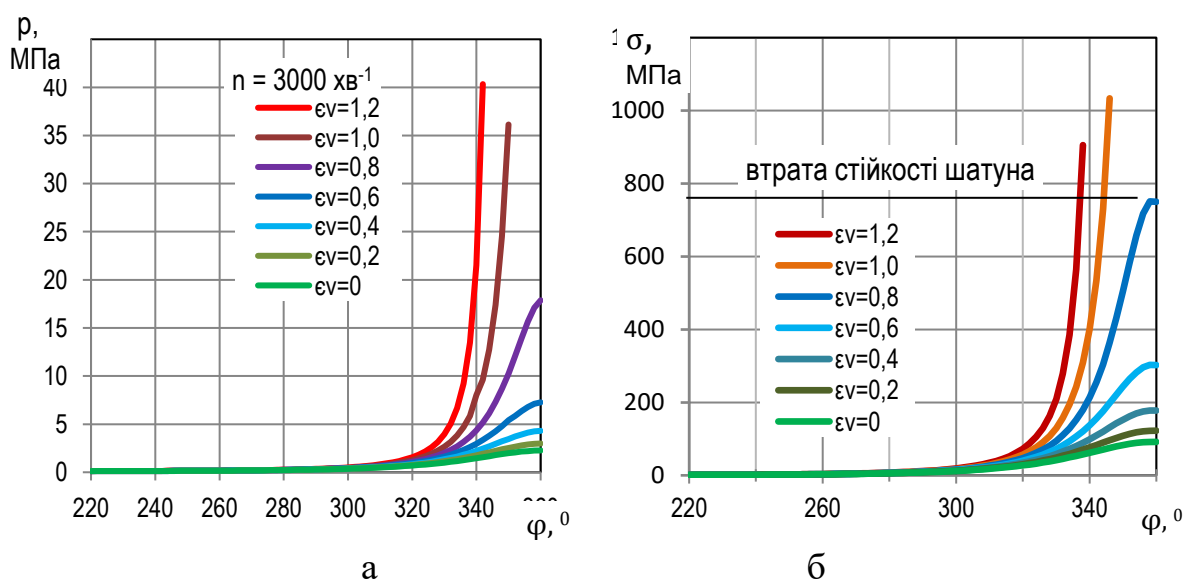


Рисунок 3 – Зміна тиску в циліндрі (а) та напружень стиснення у стрижні шатуна (б) по куту повороту колінвала при різному коефіцієнті заповнення камери згорання рідиною [3]

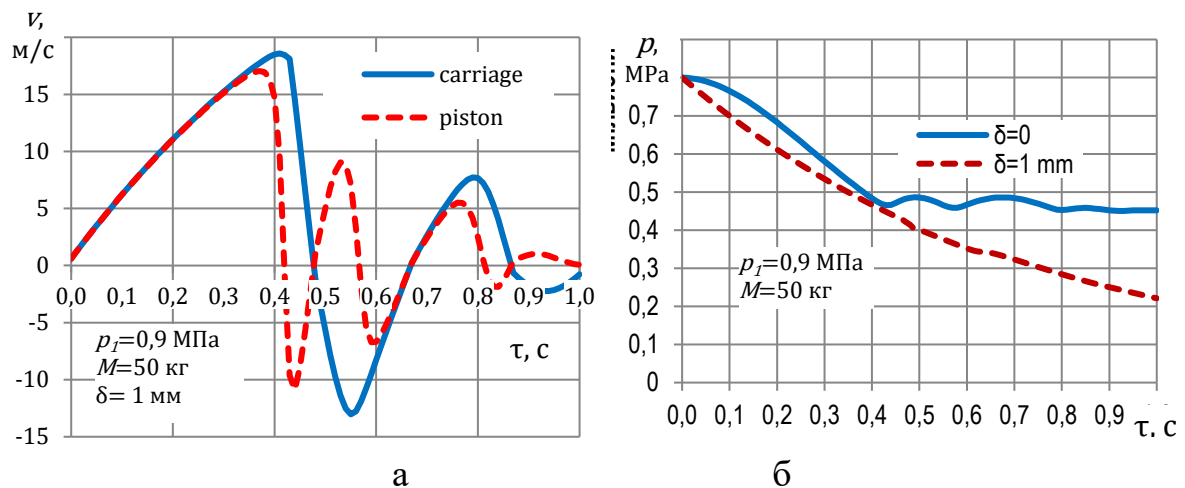


Рисунок 4 – Зміна швидкості візка та поршня катапульти (а) та вплив витікання повітря з циліндра на зміну його тиску (б) за часом [5]

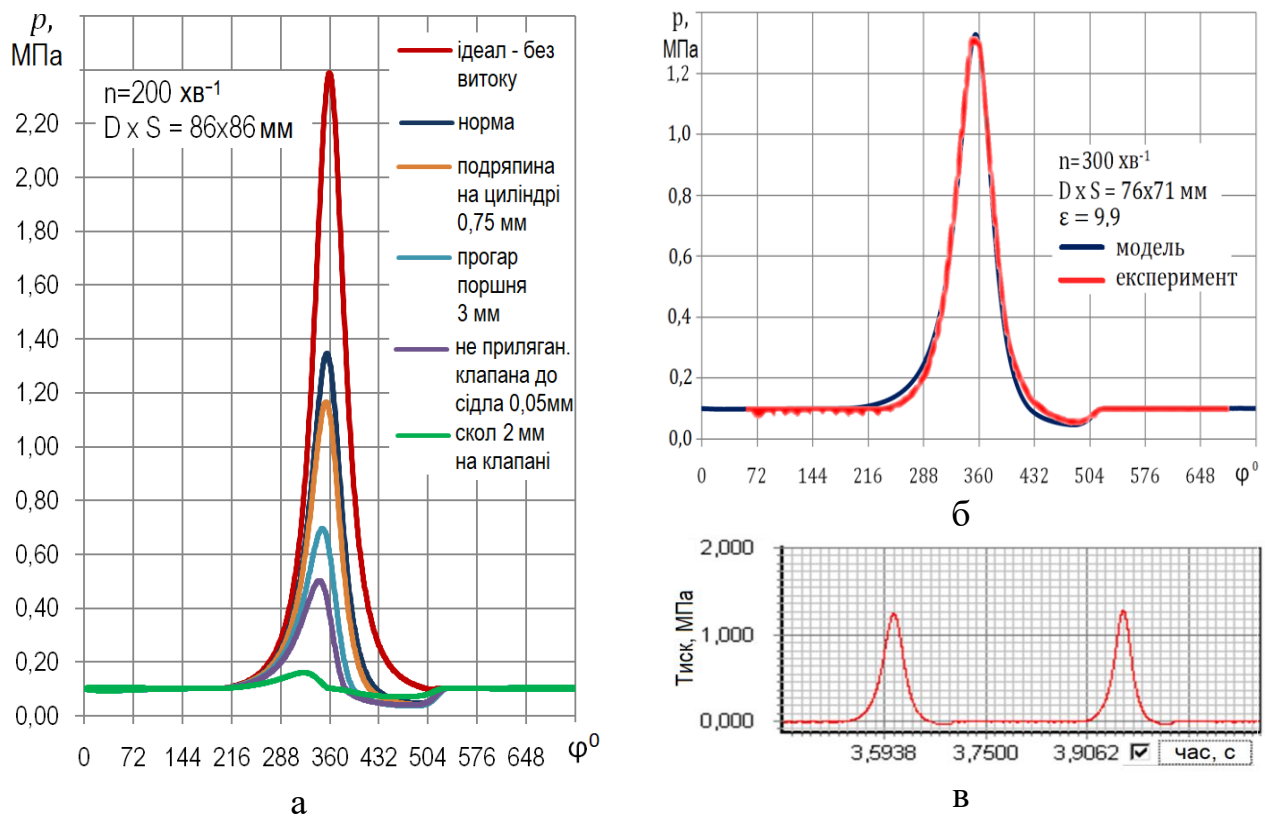


Рисунок 5 – Результати моделювання індикаторної діаграми двигуна в процесі прокручування при вимірюванні компресії для різних видів пошкоджень (а) та порівняння розрахункової діаграми (б) з відомими даними [6] тестів компресії (в)

Висновки. Розроблено універсальну термодинамічну модель для розрахунку робочого процесу систем типу «циліндр-поршень», яка покроково описує процеси в циліндрі, враховує реальний характер процесів впуску-випуску та витікання повітря через поєднання деталей. Контрольне математичне моделювання та порівняння з відомими експериментальними даними щодо осцилографування тиску в циліндрі двигуна при холодному прокручуванні показало, що

результати моделювання відповідають досвідченим даним. Як перспектива подальших досліджень передбачається вдосконалення моделі для поліпшення стійкості розрахункового алгоритму, обліку змінної швидкості обертання та теплообміну, а також продовження дослідження самої моделі з метою її застосування при проектуванні пристроїв та діагностиці різних видів їх ушкоджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Second Edition. New York : McGraw-Hill Education, 2018. 1056 p.
2. Хрулев О. Е., Сараєва І. Ю., Воробйов О. М., Сохін А. А. Оцінка можливості використання математичних моделей для експертних досліджень пошкоджень двигуна автомобіля. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2022. No. 21. С. 79–86. URL: <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.21.0.06>.
3. Khrulev A., Dmitriev S. Study of the conrod deformation during piston interaction with liquid in the internal combustion engine cylinder. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2019. Volume 14, Issue 2. P. 6557–6569. URL: <https://journal.ump.edu.my/jmes/article/view/1820/778>.
4. Khrulev A. Analysis of pneumatic catapult launch system parameters, taking into account engine and UAV characteristics. *Advanced UAV*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 10–24. URL: <https://publish.mersin.edu.tr/index.php/uav/article/view/1045>.
5. Хрулев О. Е. Математична модель пневматичної пускової системи з урахуванням характеристик безпілотної літального апарату, двигуна та повітряного гвинта. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023. № 4, спецвипуск 1 (189). С. 38–51. URL: <https://doi.org/10.32620/akt.2023.4sup1.06>.
6. Saraieva I., Khrulev A., Vorobiov O., Sebko D. Digital diagnostics for determining the tightness of the combustion camera of the car engine. *Vehicle and electronics. Innovative technologies*. 2020. Vol. 18. P. 52–64. URL: <http://veit.khadi.kharkov.ua/article/view/218831>.

Хрулев О. Е. – к.т.н., с.н.с., судовий експерт Міжнародного моторного бюро, Немішаєве Київська обл. ORCID: 0000-0002-6841-9225; e-mail: info@engine-expert.com.