

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-41>

УДК 621.81

ТИМОЩУК ОЛЕКСАНДР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0149-8878>e-mail: tymoshchukolex@khmnu.edu.ua**НЕЙМАК ВІТАЛІЙ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-1204-3932>e-mail: nejmakvi@khmnu.edu.ua**КОРОТИЧ ОЛЬГА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-7733-3095>e-mail: korotychol@khmnu.edu.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ ТРИВАЛОСТІ ПЕРЕТІКАННЯ ПОТОКУ ГАЗУ В БЕЗЗМАЩУВАЛЬНИХ ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕННЯХ

На основі використання методу випадкових полів були виконані вдосконалені методи розрахунку тривалості перетікання робочого середовища-газу в беззмашувальних поршневих ущільненнях для виконання зручних практичних методик обчислень, що будуть застосовані для машинобудування. Ціллю роботи служить дослідження створених удосконалених методів розрахунку часу тривалості перетікання потоку робочого газу в поршневих металополімерних ущільнень.

Підсумком даної роботи служить удосконалення практичного методу розрахунку тривалості перетікання робочого газового середовища в поршневих ущільненнях, а також оцінка точності розробленого методу для застосування в конструкторській діяльності проектування поршневих ущільнень компресорних установок. В статті розглядається пружний контакт сильно анізотропної полімерної шорсткої поверхні з металевою гладкою поверхнею.

Розроблена удосконалена формула обчислення номінального контактного тиску в спряженні поршень - циліндр, яка є придатною для інженерних практичних розрахунків при будь-яких реально можливих співвідношеннях зовнішнього діаметру поршня та внутрішнього діаметру циліндра до складання. Обчислення часу тривалості натікання робочого газу в поршневому ущільненні було зроблено за допомогою оригінальної програми Versuch 2 [4].

Була проведена перевірка вдосконаленого методу визначення часу тривалості натікання потоку робочого газу в поршневому ущільненні. Дослідження були виконані на 9-ти зразках, виготовлених з конструкційних матеріалів - флубон 20, вініпласт, фторопласт 4, і засвідчили добру точність нашого методу. Розходження між результатами розрахунку та результатами експерименту знаходились в межах від 5,96% до 15,37%.

Ключові слова: спектральні моменти; нормальний стохастичний процес; метод випадкових полів; перетікання потоку робочого середовища; тривалість натікання робочого газу в поршневому ущільненні

TYMOSHCHUK OLEKSANDER, NEIMAK VITALII, KOROTYCH OLGA

Khmelnitsky National University

STUDY OF THE ACCURACY OF AN IMPROVED METHOD FOR CALCULATING THE DURATION OF GAS FLOW IN PISTON SEALS WITHOUT LUBRICATION

Based on the use of the random field method, improved methods for calculating the duration of the flow of the working medium-gas in greaseless piston seals were developed to perform convenient practical calculation methods that will be used in mechanical engineering. The purpose of the work is to study the created improved methods for calculating the duration of the flow of the working gas flow in piston metal-polymer seals.

The result of this work is the improvement of the practical method for calculating the duration of the flow of the working gas medium in piston seals, as well as the assessment of the accuracy of the developed method for use in design activities for the design of piston seals of compressor units. The article considers the elastic contact of a highly anisotropic polymer rough surface with a smooth metal surface.

An improved formula for calculating the nominal contact pressure in the piston-cylinder interface has been developed, which is suitable for engineering practical calculations for any realistically possible ratios of the outer diameter of the piston and the inner diameter of the cylinder before assembly. The calculation of the duration of the working gas flow in the piston seal was made using the original Versuch 2 program [4].

An improved method for determining the duration of the flow of the working gas in the piston seal was tested. The studies were performed on 9 samples made of structural materials - flubon 20, vinyl plastic, and fluoroplastic 4, and demonstrated good accuracy of our method. The differences between the calculation results and the experimental results ranged from 5.96% to 15.37%.

Keywords: spectral moments; normal stochastic process; random field method; flow of the working medium; duration of working gas flow in the piston seal

Стаття надійшла до редакції / Received 04.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 22.05.2025

Формулювання цілі статті

На основі використання методу випадкових (стохастичних) полів були виконані вдосконалені методи розрахунку часу тривалості перетікання робочого середовища-газу в поршневих ущільненнях для виконання зручних практичних методик обчислень, що будуть застосовані для машинобудування. Ціллю роботи служить дослідження створених удосконалених методів розрахунку часу тривалості перетікання потоку робочого газу в поршневих металополімерних ущільненнях.

Формулювання проблеми у загальному вигляді

Згідно джерела [1] використаємо профілограму, записану в напрямку на реальній шорсткій поверхні $z=z(x,y)$. Оскільки вісі Ox , Oy знаходяться на середній площині поверхні, величини висот точок спряженої поверхні відмірюються від середньої площини. Згідно причини кінематики переміщення елементів спряжених поверхонь, шорсткі поверхні ущільнень можна розглядати як поверхні із значної анізотропією, тоді їх можна характеризувати на основі профілограм, записаної в поперечному напрямку. Оскільки задача про пружний контакт двох шорстких поверхонь може бути [2, 3] перетворена в наступну задачу про контактування шорсткої площини з еквівалентною гладкою поверхнею, то саме даною розрахунковою схемою і будемо в подальшому користуватися. Наступним поясненням для вибору такої розрахункової схеми є те, що переважно та найчастіше використовуються металополімерні пари [4] в беззмасувальних поршневих ущільненнях.

Микола Семенюк розглядав Z як стохастичну функцію однієї змінної випадкового процесу [5], а дослідну профілограму як реалізацію такого стохастичного процесу $z=z(r)$. Очевидно, що функція $z(r)$ є стаціонарним нормальним процесом з середнім рівним нулю

$$\overline{z(r)} = 0$$

кореляційна функція

$$K_{\theta}(r) = \lim_{L_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{2L_0} \int_{-L_0}^{L_0} z(r_1)z(r_1+r)dr_1. \quad (1)$$

Ефективно і краще працювати із спектральною функцією, яка пов'язана з кореляційною функцією за допомогою перетворення Фур'є:

$$\Phi_{\theta}(k') = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K_{\theta}(r) e^{-ik'r} dr. \quad (2)$$

В загальному вигляді спектральні моменти $m_{n\theta}$ виглядають як:

$$m_{n\theta} = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{\theta}(k') k'^n dk'. \quad (3)$$

Спектральний момент m_0 це дисперсія висот точок спряженої поверхні, спектральний момент m_4 - описує кривизни нерівностей схилів та підйомів, а спектральний момент m_2 визначає нахили нерівностей в площині профілограм. Стандартні параметри профілограм дають змогу швидко розрахувати спектральні моменти [4].

Виклад основного матеріалу

Спряжені поверхні циліндру та поршня на початковій стадії дослідження вважали поверхні контакту циліндру та поршня гладкими. Розрахункова схема зображена на рис.1. Потім на наступному етапі були змінені умови, що в зазор ущільнення натікає потік робочого газу і також поршнева поверхня мала бути досить шорсткою.

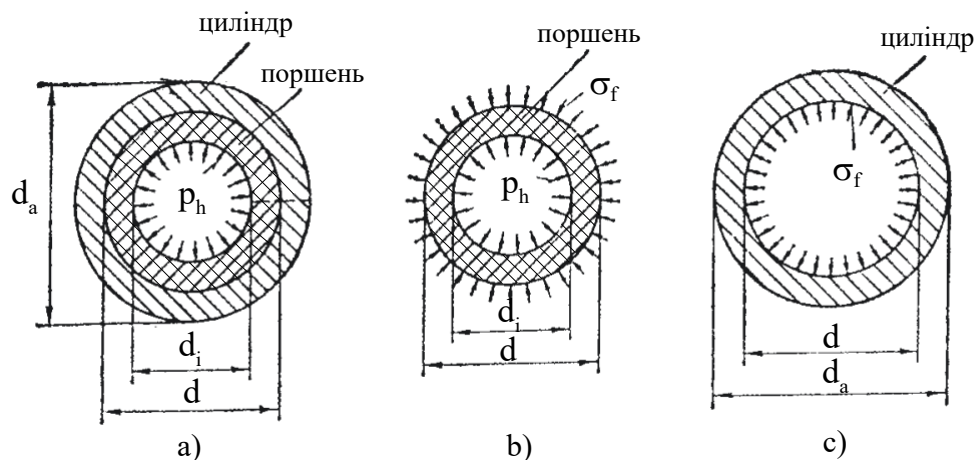


Рис. 1 Схема поршневого ущільнення:
а) напрямки сил, що зображені в ущільненні; б) вектори сил, які винятково діють на зразок поршня;
с) вектори сил, які винятково впливають на зовнішній циліндр

Згідно рис.1 p_h – тиск газу (робочого середовища) зразка поршня, σ_f – номінальний контактний тиск в контактній парі поршень - циліндр для гладких поверхонь. Формула Ляме [7] дала змогу розрахувати зміну радіуса поршня d :

$$u_P = \frac{1-\nu_P}{E_P} \frac{d_i^2 p_h - d^2 \sigma_f}{d^2 - d_i^2} r + \frac{1+\nu_P}{E_P} \frac{d_i^2 (p_h - \sigma_f)}{d^2 - d_i^2} r, \quad (4)$$

де ν_P, E_P - модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона робочого матеріалу зразка поршня.

Якщо прийняли

$$k_P = (d_i/d)^2 \quad (5)$$

і змінили формулу (4):

$$\frac{u_P}{r} = \frac{2k_P p_h - [1 - \nu_P + k_P(1 + \nu_P)] \sigma_f}{(1 - k_P) E_P}. \quad (6)$$

Застосували позначення

$$\chi_1 = \frac{2k_P}{(1 - k_P) E_P}; \quad (7)$$

$$\chi_2 = \frac{1 - \nu_P + k_P(1 + \nu_P)}{(1 - k_P) E_P}, \quad (8)$$

В кінцевому результаті мали:

$$\frac{u_P}{r} = \chi_1 p_h - \chi_2 \sigma_f. \quad (9)$$

Формула Ляме [6] дала змогу розрахувати зміну радіуса зразка циліндра d :

$$u_C = \frac{1-\nu_C}{E_C} \frac{d_a^2 \sigma_f}{d_a^2 - d^2} r + \frac{1+\nu_C}{E_C} \frac{d_a^2 \sigma_f}{d_a^2 - d^2} r, \quad (10)$$

де ν_C, E_C - модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона робочого матеріалу зразка циліндра.

Прийняли

$$k_C = (d/d_a)^2 \quad (11)$$

та представили формулу (10):

$$\frac{u_C}{r} = \frac{1 + k_C + \nu_C(1 - k_C)}{(1 - k_C) E_C} \sigma_f. \quad (12)$$

Використали позначення

$$\chi_3 = \frac{1 + k_C + \nu_C(1 - k_C)}{(1 - k_C) E_C}, \quad (13)$$

і в результаті:

$$\frac{u_C}{r} = \chi_3 \sigma_f. \quad (14)$$

Використали позначення d'_C - діаметр зразка циліндра до складання та d' - зовнішній діаметр поршня. Тоді в результаті діаметральний натяг:

$$\delta = d' - d'_C. \quad (15)$$

Використали наступні формули:

$$u_C = u_P + \frac{\delta}{2}, \quad \frac{u_C}{r} = \frac{u_P}{r} + \frac{\delta}{2r}. \quad (16)$$

Потім у формулу (16) взяли формули (9, 14):

$$\chi_3 \sigma_f = \chi_1 p_h - \chi_2 \sigma_f + \frac{\delta}{d}. \quad (17)$$

В результаті:

$$\sigma_f = \frac{\chi_1}{\chi_2 + \chi_3} p_h + \frac{1}{\chi_2 + \chi_3} \frac{\delta}{d}. \quad (18)$$

В силу того, що поршень вироблений з конструкційного полімеру, циліндр вироблений з конструкційної сталі 45, тому $\chi_2 \gg \chi_3$. Надалі з формул (7, 8, 18) кінцева формула отримала вигляд:

$$\sigma_f = \frac{2k_P}{1 - \nu_P + k_P(1 + \nu_P)} p_h + \frac{\delta(1 - k_P) E_P}{d[1 - \nu_P + k_P(1 + \nu_P)]}. \quad (19)$$

В результаті формула (19) отримала зручний вигляд для розрахунків поршневих ущільнень до фінального складання.

Для поршневого ущільнення номінальний контактний тиск σ_n розраховувався за формулою:

$$2(\sigma_n - \sigma_f - p_1) + [(2 - \gamma)p_1 + \gamma p_2] \exp\left(-\frac{1,83\sigma_n}{Eq}\right) = 0, \quad (20)$$

де γ - обрховується [4, 6] наступним чином:

$$\gamma = 1,4k_N / \sqrt[3]{b^2}, \quad (21)$$

E - зведений модуль Юнга;

k_N - коефіцієнт Новікова І. [4, 6], який стосовний щодо матеріалу поршня;

p_1, p_2 - значення тиску робочого газу перед і за кільцем ущільнення;

q - градієнт спряженої поверхні.

Для швидкості зміни маси потоку робочого газу в замкненій камері:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\mu W}{RT} \frac{dp}{dt} . \quad (22)$$

На основі перетікання робочого газу $Q(p)$ було розраховано зміну маси газу в замкненій камері :

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\rho_0}{p_0} Q(p) , \quad (23)$$

де ρ_0 - величина густини робочого газу для нормальних умов.

В результаті підстановок (22) та (23) отримали формулу:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT\rho_0}{\mu W p_0} Q(p) . \quad (24)$$

$$k_t = \frac{\mu W p_0}{RT p_0} . \quad (25)$$

Надалі отримали:

$$dt = \frac{k_t}{Q(p)} dp . \quad (26)$$

Формула (26) дала змогу розраховувати час тривалості перетікання робочого середовища – потоку газу:

$$t = k_t \int_{p_a}^{p_s} \frac{dp}{Q(p)} . \quad (27)$$

Програма Versuch 2, зроблена на основі Mathcad Professional, допомогла виконати інженерний розрахунок часу перетікання потоку газу в поршневому ущільненні [4].

Для дослідження точності удосконаленого методу розрахунку тривалості перетікання потоку газу були враховані наступні характеристики для нашого експерименту.

1. Модуль пружності матеріалу поршня E_p .
2. Параметри шорсткості зразка поршня:
 - градієнт заданої поверхні q ;
 - відхилення середньоарифметичне Ra точок спряженого профілю.
3. Коефіцієнт Новікова І. [4, 6] k_N , який застосований щодо матеріалу поршня.
4. Коефіцієнт Пуассона для зразка поршня μ_p .
5. Ширина b контакної поверхні.
6. Діаметр внутрішній зразка циліндра до складання d'_c .
7. Розміри діаметральні зразка поршня:
 - внутрішній d_i .
 - зовнішній d' ;
8. Молярна маса потоку робочого газу μ .
9. Густина робочого газу ρ_0 для нормальних фізичних умов.
10. Фізичні константи для робочого газу в поршневого ущільненні:
 - стала Больцмана k ;
 - газова стала молярна R .
11. Діаметр ефективний для молекули робочого газу d_m .
12. Динамічна в'язкість η_B робочого газу.
13. Тиск робочого газу всередині зразка поршня p_h .
14. Абсолютна температура потоку робочого газу T .
15. Тиск робочого газу при нормальних фізичних умовах p_0 .
16. Тиск кінцевий робочого газу в замкненій камері p_s .
17. Діаметр ефективний для молекули робочого газу d_m .
18. Тиск потоку робочого газу на вході ущільнюючого елементу p_e .
19. Тиск початковий робочого газу в замкненій камері p_a .
20. Об'єм W робочої камери.

Експерименти були виконані наступним чином згідно джерела [4] :

1. За формулами (20, 21) визначається контактний тиск в поршневого ущільненні $\sigma_n(p, p_e, q)$.
2. Питома площа спряженої поверхні $S(q)$ та спектральні моменти $m_0(Ra), m_2(q)$ згідно [4]
3. Еквівалентний діаметр каналів в спряженні:
 - еквівалентний діаметр $d_p(Ra, p, p_e, q)$;
 - еквівалентний діаметр $d_f(Ra, p, p_e, q)$;
 - зведений еквівалентний діаметр $d_{екв}(Ra, p, p_e, q)$.
4. Спочатку обрахували довжину пробігу $\lambda(p, p_e)$, а потім швидкість молекул робочого газу V_g . В результаті тиск робочого газу в поршневого ущільненні:

$$p_{cp}(p) = 0,5(p_e + p) .$$
5. Об'єм перетікання потоку робочого газу:
 - для молекулярного режиму $Q_M(Ra, p, p_e, q)$;

- для в'язкісного режиму $Q_B(Ra, p, p_e, q)$;
- для перехідного режиму $Q_U(Ra, p, p_e, q)$;

$$Q(Ra, p, p_e, q) = \begin{cases} Q_M(Ra, p, p_e, q), k_r(Ra, p, p_e, q) > 1; \\ Q_B(Ra, p, p_e, q), k_r(Ra, p, p_e, q) < 0,01; \\ Q_U(Ra, p, p_e, q), 0,01 \leq k_r(Ra, p, p_e, q) \leq 1. \end{cases},$$

де

$$k_r(Ra, p, p_e, q) = \bar{\lambda}(p, p_e) / d_{\text{екв}}(Ra, p, p_e, q).$$

6. Час натікання потоку робочого газу $t(Ra, q, p_e)$ було обчислено за формулою (27).

Висновки

На основі методу випадкових (стохастичних) полів були розроблені удосконалені методи розрахунку тривалості натікання робочого газу в спряженнях поршневих ущільнень. Результатом є розробка експериментально перевірених методів розрахунку часу тривалості перетікання потоку робочого газу в беззмашувальних поршневих ущільненнях різноманітних машин.

Була проведена перевірка вдосконаленого методу визначення часу тривалості натікання потоку робочого газу в поршневому ущільненні. Дослідження були виконані на 9-ти зразках, виготовлених з конструкційних матеріалів - флубон 20, вініпласт, фторопласт 4, і засвідчили добру точність нашого методу. Розходження між результатами теоретичного розрахунку та результатами експерименту знаходилося в допустимому інтервалі 5,96% ... 15,37%.

Література

1. Francis H. A. Application of spherical indentation mechanics to reversible and irreversible contact between rough surfaces // *Wear*. – 1977. – V. 45, № 2. – P. 221–269.
2. Nayak P. R. Random process model of rough surfaces in plastic contact // *Wear*. – 1973. – V. 26. – P. 305–333.
3. Semenjuk M. F. Entwicklung von Berechnungsverfahren der Reibungs- und Verschleißtheorie mit Hilfe des Modells stochastischer Felder : Diss. B an der Technischen Hochschule Zittau. – Zittau, 1991. – 160 S.
4. Опір матеріалів / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, В. Г. Попков, Е. С. Уманський. – К. : Техніка, 1997. – 792 с.
5. Тимошук О. Г. Розробка методів розрахунку та експериментального дослідження герметичності беззмашувальних циліндро-поршневих ущільнень : дис. ... канд. техн. наук. – Хмельницький, 2003. – 386 с.
6. Макушкин А. П. Научно-технические основы создания полимерных уплотнений и узлов трения оборудования криогенных систем : дис. ... д-ра техн. наук. – Балашиха, 1982. – 511 с.

References

1. Francis H. A. Application of spherical indentation mechanics to reversible and irreversible contact between rough surfaces // *Wear*. – 1977. – V. 45, № 2. – P. 221–269.
2. Nayak P. R. Random process model of rough surfaces in plastic contact // *Wear*. – 1973. – V. 26. – P. 305–333.
3. Semenjuk M. F. Entwicklung von Berechnungsverfahren der Reibungs- und Verschleißtheorie mit Hilfe des Modells stochastischer Felder : Diss. B an der Technischen Hochschule Zittau. – Zittau, 1991. – 160 S.
4. Opir materialiv / H. S. Pysarenko, O. L. Kvitka, V. H. Popkov, E. S. Umanskyi. – K. : Tekhnika, 1997. – 792 s.
5. Tymoshchuk O. H. Rozrobka metodiv rozrakhunku ta eksperymentalnoho doslidzhennia hermetichnosti bezzmashchuvalnykh tsylindro-porshnevykh ushchilnen : dys. ... kand. tekhn. nauk. – Khmelnytskyi, 2003. – 386 s.
6. Makushkin A. P. Nauchno-tekhnicheskoye osnovy sozdaniya polimernykh uplotneniy u uzlov treniya oborudovaniya kryogennykh system : dys. ... d-ra tekhn. nauk. – Balashykh, 1982. – 511 s.