УДК 621.81

О.Г. ТИМОЩУК
Хмельницький національний університет

РОЗРОБКА ТА АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЩІЛЬНОСТІ КАНАЛІВ ТА ЕКВІВАЛЕНТНОГО ДІАМЕТРУ КАНАЛІВ БЕЗЗМАЩУВАЛЬНИХ ЦИЛІНДРО-ПОРШНЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ

На основі теорії стохастичних процесів розроблені методи розрахунку основних характеристик контакту спряжених поверхонь беззмащувальних циліндро-поршневих ущільнень. Результатом є створення інженерних методів розрахунку герметичності (тривалості натікання газу) в беззмащувальних циліндро-поршневих металополімерних ущільненнях. В статті розглядається пружний контакт сильно анізотропної шорсткої поверхні (полімерна поверхня) з гладкою (металева поверхня). Поставлено задачу розробити інженерні методи розрахунку основних характеристик контакту спряжених поверхонь беззмащувальних циліндро-поршневих металополімерних ущільнень – середньої висоти зазору та питомої площі шорсткої поверхні контакту, а також виконати аналіз точності розроблених методів.

Ключові слова: контакт; номінальний контактний тиск; питома площа шорсткої поверхні контакту; щільність каналів; еквівалентний діаметр каналів; тривалість натікання газу; беззмащувальні циліндро-поршневі ущільнення; профілограма, теорія стохастичних полів.

O.G. TYMOSHCHUK
Khmelnytskyi National University

DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF ACCURACY OF CALCULATION METHODS THE DENSITY OF THE CHANNELS AND THE EQUIVALENT DIAMETER OF THE CHANNELS OF OIL-FREE CYLINDER-PISTON SEALS

On the basis of the theory of stochastic processes, methods for calculating the main characteristics of the contact of the conjugated surfaces of the non-greasy cylinder-piston seals are developed. The result is the creation of engineering methods for calculating the tightness (duration of gas leakage) in the non-greasy cylinder-piston metal-polymer seals. The article deals with the elastic contact of a strongly anisotropic rough surface (polymeric surface) with a smooth (metal surface). The task is to develop and investigate engineering methods for calculating the main characteristics of the sealing of the non-greasy cylinder-piston seals - the density of the channels and the equivalent diameter of the channels in the zone of coupling of metal-polymer seals, as well as perform the analysis of the accuracy of the developed methods. the dependence of the density of channels on the complex of contact conditions is of an extreme nature. The channel density (the number of channels per unit of nominal profile length recorded in the transverse direction to the direction of the medium stream) can be calculated as the difference between the surface of contact surfaces that have come into contact and the density of the depressions that are above a given level. Mode of flow of gas in the seal is determined by the Knudsen criterion. On the basis of the formula of the effective level of deformation for a given value of the complex of contact conditions with the help of Kanal [7], written using the software product Mathcad 2000 Professional, the relationship of channel density with the complex of contact conditions is calculated. As the contact conditions increase, the density of the channels initially increases, and then decreases. This is due to the influence of the process of fusion of contact spots in the loading process. The maximum number of channels is reached at K = 0.6315. To determine the channel density, the exact formula is derived. On the basis of the exact formula, the calculated formula is obtained. Values calculated from the exact and calculated channel density formula do not differ by more than 0.0045. Precise formulas of equivalent diameters are derived. Dependence of equivalent diameters from the complex of contact conditions is investigated. On the basis of exact formulas, the calculated formulas of equivalent diameters are obtained. Values calculated on the exact and calculated formula of the consolidated equivalent diameter do not differ by more than 9%, for the consolidated equivalent diameter the difference does not exceed 10%.

Keywords: contact; nominal contact pressure; specific area of the rough surface of the contact; channel density; equivalent diameter of channels; duration of gas flow; non-greasy cylinder-piston seals; profile graph, theory of stochastic fields.

Постановка проблеми. Методи розрахунку герметичності беззмащувальних циліндро-поршневих ущільнень базуються на поєднанні фізичних законів, що описують процес натікання робочого середовища (газу) з закономірностями, що визначають характеристики контакту шорстких анізотропних поверхонь, такі як фактична площа контакту, міжконтактний об'єм, середній зазор. Втрати робочого середовища залежать від кубу середнього зазору, тому похибка в 20% в визначенні цієї величини призводить до похибки в 73% при розрахунку натікань. Таким чином, точність розрахунку натікань значною мірою залежить від точності розрахунку характеристик контакту та характеристик герметичності циліндро-поршневих ущільнень.

Існуючі методи розрахунку герметичності використовують формули визначення характеристик контакту за способом опорних кривих [1–3]. Цей спосіб має низьку точність внаслідок того, що він не бере до уваги, що профілограма дає спотворене уявлення про поверхню, оскільки проходить не через вершини виступів, а схилами нерівностей. Значення величини згладжування та максимальної висоти нерівностей, необхідні для визначення характеристик контакту, визначаються за способом опорних кривих з дуже низькою точністю – для точного визначення цих величин необхідно, щоб профілограма пройшла одночасно через найвищу вершину поверхні та через саму глибоку впадину, ймовірність цього практично рівна нулю. Значно точніше характеристики контакту можна визначити за способом стохастичних процесів. Суть цього способу полягає в тому, що шорстка поверхня розглядається як реалізація стохастичного поля.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробці методів розрахунку основних характеристик контакту шорстких анізотропних поверхонь присвячені роботи Семенюка М.Ф. [5], Бачинської Н.К. [6], інших авторів. Питання герметичності циліндро-поршневих та торцевих ущільнень розглядались в роботах

Семенюка М.Ф. [5], Калди Г.С. [4], Бачинської Н.К. [6], в яких розрахунки базуються на застосуванні теорії стохастичних процесів. Найбільш детально розроблені розрахунки герметичності беззмащувальних циліндро-поршневих ущільнень в роботі [7].

Формулювання цілі статті. Необхідно розробити і дослідити інженерні методи розрахунку основних характеристик герметичності беззмащувальних циліндро-поршневих ущільнень – щільності каналів та еквівалентного діаметру каналів в зоні спряження металополімерних ущільнень.

Виклад основного матеріалу. Якщо дзеркально відобразити точки шорсткої поверхні відносно її середньої площини, то виступи перетворяться у впадини і навпаки. Звідси випливає, що щільність ймовірності висот впадин $\varphi(\varepsilon)$ і щільність висот вершин $p(\varepsilon)$ зв'язані простим співвідношенням:

$$\varphi(\varepsilon) = p(-\varepsilon). \tag{1}$$

Зважаючи на формулу щільності ймовірності висот виступів профілю (максимумів нормального стохастичного процесу), маємо:

$$\varphi(\varepsilon) = \frac{\delta}{\sqrt{2\pi}}\left\{\exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\delta^2}\right) - \sqrt{\pi}\chi\varepsilon\exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right)\left[1 - erf(\chi\varepsilon)\right]\right\} . \tag{2}$$

Щільність каналів δ_k (кількість каналів, що приходиться на одиницю номінальної довжини профілю, записаного у поперечному напрямку до напрямку плину середовища) може бути розрахована як різниця між щільністю δ' виступів поверхні, які вступили в контакт, та щільністю δ'' впадин, які розташовані вище даного рівня u :

$$\delta_k = \delta' - \delta'' . \tag{3}$$

Позначимо D – щільність виступів поверхні. Тоді величина δ' визначиться за формулою:

$$\delta' = D\int_u^\infty p(\varepsilon)d\varepsilon . \tag{4}$$

В силу статистичної симетрії шорсткої поверхні відносно її середньої площини щільність впадин поверхні рівна щільності виступів. Враховуючи це, маємо:

$$\delta'' = D\int_u^\infty \varphi(\varepsilon)d\varepsilon . \tag{5}$$

Підставивши (4) і (5) в (3), отримаємо:

$$\delta_k = D\left[\int_u^\infty p(\varepsilon)d\varepsilon - \int_u^\infty \varphi(\varepsilon)d\varepsilon\right] . \tag{6}$$

Перетворимо вираз у дужках, враховуючи формулу щільності ймовірності висот виступів профілю та формулу (2):

$$\frac{\sqrt{2\pi}}{\delta}\int_u^\infty p(\varepsilon)d\varepsilon = \int_u^\infty \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\delta^2}\right)d\varepsilon + \sqrt{\pi}\chi\int_u^\infty \varepsilon\exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right)d\varepsilon + \\ + \sqrt{\pi}\chi\int_u^\infty \varepsilon\exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right)\mathrm{erf}(\chi\varepsilon)d\varepsilon . \tag{7}$$

$$\frac{\sqrt{2\pi}}{\delta}\int_u^\infty \phi(\varepsilon)d\varepsilon = \int_u^\infty \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\delta^2}\right)d\varepsilon - \sqrt{\pi}\chi\int_u^\infty \varepsilon\exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right)d\varepsilon + \\ + \sqrt{\pi}\chi\int_u^\infty \varepsilon\exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right)\mathrm{erf}(\chi\varepsilon)d\varepsilon . \tag{8}$$

Підставимо (7) і (8) в (6):

$$\delta_k = \sqrt{2}D\delta\chi\int_u^\infty \varepsilon\exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right)d\varepsilon . \tag{9}$$

Інтегруємо:

$$\int_{u}^{\infty} \varepsilon \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2}\right) d\varepsilon = \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) . \quad (10)$$

З урахуванням формули параметра широкополосності α - безрозмірної величини, що визначається за формулою:

$$\alpha = m_0 m_4 / m_2^2 ,$$

формули щільності вершин шорсткої поверхні D :

$$D = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{m_4}{m_2}}$$

та позначень до формули щільності ймовірності висот виступів профілю, перетворимо множник формули (9):

$$\sqrt{2}\,\delta\chi = \left(\frac{m_2^2}{m_0 m_4}\right)^{1/2} ;$$

$$\sqrt{2}\,D\delta\chi = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} . \quad (11)$$

Підставивши (10) і (11) в (9), отримаємо формулу:

$$\delta_k = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) . \quad (12)$$

На підставі формули ефективного рівня деформації за заданою величиною комплексу умов контактування:

$$1 - \exp(-K) - \frac{1}{2} erfc\left(\frac{u}{\sqrt{2}}\right) = 0 \quad (13)$$

та формули (12) за допомогою програми Kanal [7], написаної з використанням програмного продукту Mathcad 2000 Professional, розрахований зв'язок щільності каналів з комплексом умов контактування. Отримані результати представлені на рис. 1.

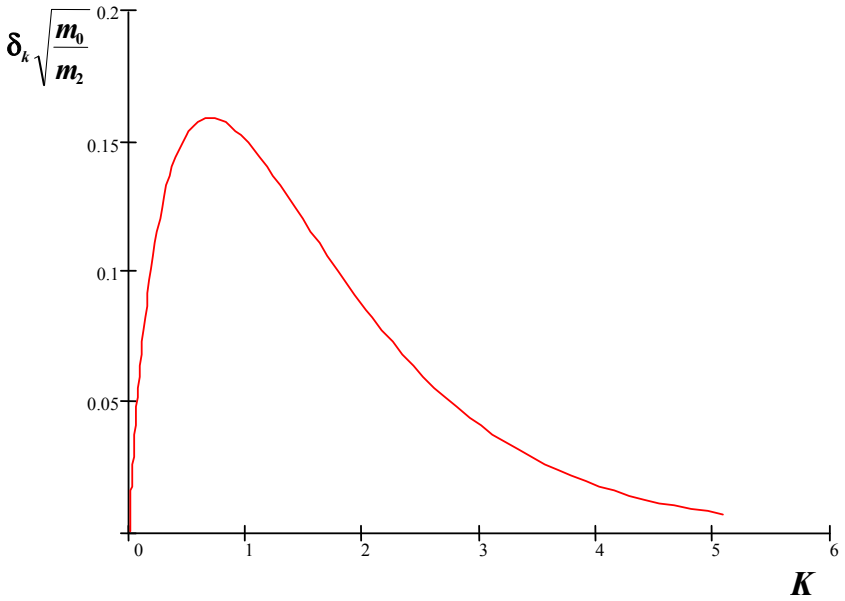

Рис. 1. Залежність щільності каналів від комплексу умов контактування

Очевидно, що залежність щільності каналів від комплексу умов контактування носить екстремальний характер. З ростом комплексу умов контактування щільність каналів спочатку зростає, а потім зменшується. Це пояснюється впливом процесу злиття плям контакту в процесі навантаження. Максимальна кількість каналів досягається при $K = 0{,}69315$ і становить

$$\delta_{k,\max} = 0{,}15915\left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} . \quad (14)$$

Залежність, представлена на рис.1, була апроксимована формулою:

$$\delta_k = 0{,}787\left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} K^{0{,}733}\exp\left[-\left(K+0{,}633\right)^{1{,}028}\right]. \qquad (15)$$

Формула (15) отримана в результаті розрахунків за програмою Appr_K [7].

Режим натікання газу в ущільненні визначається за критерієм Кнудсена [8], тобто за величиною співвідношення $\overline{\lambda}/d_{\text{екв}}$:

- $\overline{\lambda}/d_{\text{екв}} > 1{,}0$ – молекулярний режим;
- $\overline{\lambda}/d_{\text{екв}} < 0{,}01$ – в'язкісний режим;
- $0{,}01 \le \overline{\lambda}/d_{\text{екв}} \le 1{,}0$ – перехідний режим,

де $d_{\text{екв}}$ – еквівалентний діаметр каналів;

$\overline{\lambda}$ – середня довжина вільного пробігу молекули газу, яка розраховується за формулою [8]:

$$\overline{\lambda} = \frac{kT}{\pi\sqrt{2}\, d_m^{\,2} p_{\text{ср}}}, \qquad (16)$$

де k – стала Больцмана;

T – абсолютна температура газу;

d_m – ефективний діаметр молекули газу;

$p_{\text{ср}}$ – середній тиск газу в ущільненні.

Для знаходження еквівалентних діаметрів каналів часто [9, 8, 10] користуються поняттям еквівалентного гідравлічного діаметру, який визначають за формулою:

$$d_h = \frac{4F}{P},$$

де F, P – відповідно площа та периметр каналу.

Цей підхід виправдовує себе в тих випадках, коли висота і ширина каналу не дуже різняться. В той же час, викликає сумнів правомірність такого підходу до розрахунку плину газу в контакті шорстких тіл, як це зроблено, наприклад, в [9–11]. Підстави для такого висновку наступні. Оскільки кути нахилу нерівностей реальних шорстких поверхонь складають лише декілька градусів, то висота каналу в цьому випадку набагато менша за ширину.

Розглянемо для прикладу щілинний канал еліптичної форми, що має висоту $2b$ та ширину $2a$. Площа каналу становить

$$F = \pi ab,$$

а периметр:

$$S = 4aE(\varepsilon),$$

де

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a},$$

$E(...)$ – повний нормальний еліптичний інтеграл Лежандра другого роду.

Оскільки $b << a$, то $\varepsilon \to 1$, відповідно $E(\varepsilon) \to 1$. В результаті отримуємо:

$$d_h = \pi b,$$

тобто еквівалентний гідравлічний діаметр не залежить від ширини щілинного каналу.

До аналогічного висновку можна прийти, якщо прийняти, що канал має форму прямокутника висотою $2b$ та шириною $2a$. В цьому випадку отримаємо:

$$F = 4ab;$$
$$P = 4(a+b);$$
$$d_h = \frac{4ab}{a+b}.$$

Оскільки $b << a$, то остаточно маємо:

$$d_h = 4b,$$

тобто знову ж таки приходимо до висновку, що еквівалентний гідравлічний діаметр не залежить від ширини щілинного каналу.

При визначенні еквівалентного діаметру каналу слід враховувати як його площу, так і периметр. І оскільки канал має неправильну форму, то слід очікувати, що значення еквівалентного діаметру, знайдені на підставі площі, будуть відрізнятись від значень, знайдених на підставі периметру.

Середню площу каналу F можна знайти, поділивши питомий міжконтактний об'єм V на щільність каналів δ_k:

$$F = \frac{V}{\delta_k} \quad . \tag{17}$$

Позначимо d_F - еквівалентний діаметр каналу, знайдений на підставі його площі. Виходячи з кругової форми каналу, отримаємо:

$$d_F = 2\sqrt{\frac{F}{\pi}} \quad . \tag{18}$$

Підставивши в (18) формули (17, 12) і формулу міжконтактного об'єму, отримаємо:

$$d_F = \frac{2m_0^{1/2}}{m_2^{1/4}} \sqrt{\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} + u\exp\left(\frac{u^2}{2}\right)\operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)} \quad , \tag{19}$$

або

$$\frac{d_F m_2^{1/4}}{m_0^{1/2}} = 2\sqrt{\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} + u\exp\left(\frac{u^2}{2}\right)\operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)} \quad . \tag{20}$$

На підставі формул (13) і (20) за допомогою програми Durchmesser_F [7] розрахований зв'язок еквівалентного діаметру d_F з комплексом умов контактування. Отримані результати представлені на рис. 2.

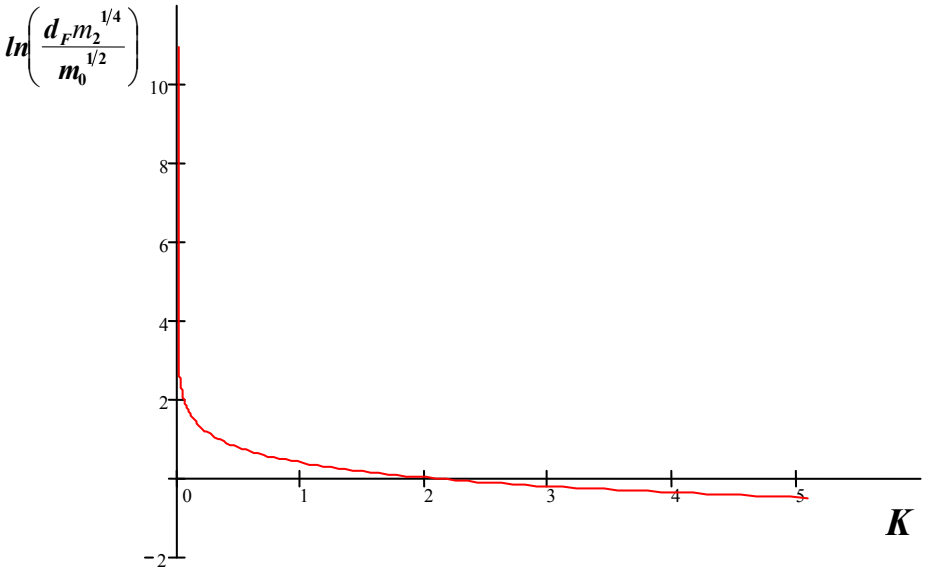

Рис. 2. Залежність еквівалентного діаметру d_F від комплексу умов контактування

Залежність, представлена на рис. 2, була апроксимована формулою:

$$\frac{d_F m_2^{1/4}}{m_0^{1/2}} = \begin{cases} \left(1 + \dfrac{1{,}328}{K^{1{,}08}}\right)^{0{,}545}, & (K \le 1); \\ 2{,}524\exp\left(-0{,}615K^{0{,}538}\right), & (K > 1) \end{cases} \tag{21}$$

Формула (21) отримана в результаті розрахунків за програмами Appr_dF_1, Appr_dF_2 [7]. Вона якісно правильно описує поведінку еквівалентного діаметру d_F при зміні номінального навантаження, оскільки з неї випливає, що:

$$\lim_{\sigma_n \to 0} d_F = \infty; \quad \lim_{\sigma_n \to \infty} d_F = 0.$$

Периметр каналу P можна знайти, поділивши питому площу поверхні стику, що омивається середовищем S_K на щільність каналів δ_k:

$$P = \frac{S_K}{\delta_k} \quad . \tag{22}$$

Позначимо d_P – еквівалентний діаметр каналу, знайдений на підставі його периметру. Виходячи з кругової форми каналу, отримаємо:

$$d_P = \frac{P}{\pi} \quad . \tag{23}$$

Підставивши в (23) формули (22, 12), отримаємо:

$$d_P = \left(\frac{m_0}{m_2}\right)^{1/2} (1+S)\exp\left(\frac{u^2}{2}\right)\operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right) \quad , \tag{24}$$

або

$$\frac{d_P}{1+S}\left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} = \exp\left(\frac{u^2}{2}\right)\operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right) \quad . \tag{25}$$

На підставі формул (13) і (25) за допомогою програми Durchmesser_P [7] розрахований зв'язок еквівалентного діаметру d_P з комплексом умов контактування. Отримані результати представлені на рис. 3.

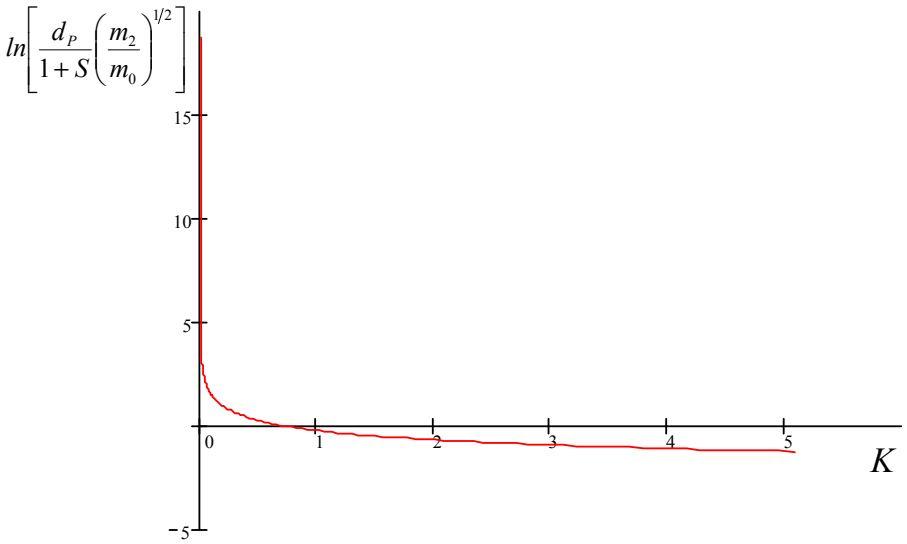

Рис. 3. Залежність еквівалентного діаметру d_P від комплексу умов контактування

Залежність, представлена на рис. 3, була апроксимована формулою:

$$\frac{d_P}{1+S}\left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} = \begin{cases} \left(1+\dfrac{0{,}321}{K^{1{,}09}}\right)^{0{,}886}, & (K \le 0{,}3); \\ 2{,}992\exp\left(-1{,}353K^{0{,}703}\right), & (0{,}3 < K \le 1{,}3); \\ 1{,}134\exp\left(-0{,}521K^{0{,}636}\right), & (K > 1{,}3) \end{cases} \tag{26}$$

Формула (26) отримана в результаті розрахунків за програмами Appr_dP_1, Appr_dP_2, Appr_dP_3 [7]. Вона якісно правильно описує поведінку еквівалентного діаметру d_P при зміні номінального навантаження, оскільки з неї випливає, що:

$$\lim_{\sigma_n \to 0} d_P = \infty; \quad \lim_{\sigma_n \to \infty} d_P = 0.$$

Оскільки значення d_F та d_P різняться внаслідок неправильної геометричної форми каналу, то за еквівалентний діаметр каналу $d_{\text{екв}}$ можна прийняти середнє значення:

$$d_{\text{екв}} = (d_F + d_P)/2 \quad . \tag{27}$$

Висновки. Для визначення щільності каналів виведена точна формула

$$\delta_k = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right),$$

де m_0, m_2 – спектральні моменти;

u – ефективний рівень деформації.

На підставі точної формули отримана розрахункова формула:

$$\delta_k = 0{,}787\left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} K^{0{,}733} \exp\left[-(K+0{,}633)^{1{,}028}\right].$$

Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою щільності каналів різняться не більше, ніж на 0,0045.

Залежність щільності каналів від комплексу умов контактування носить екстремальний характер. З ростом комплексу умов контактування щільність каналів зразу зростає, а потім зменшується. Це пояснюється впливом процесу злиття плям контакту в процесі навантаження. Максимальна кількість каналів досягається при $K = 0{,}69315$ і становить

$$\delta_{k,\max} = 0{,}15915\left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2}.$$

Для розрахунку еквівалентного діаметру запропонована формула:

$$d_{\text{екв}} = (d_F + d_P)/2,$$

де d_F, d_P – еквівалентні діаметри каналу, знайдені відповідно на підставі його площі периметру.

Виведені точні формули еквівалентних діаметрів d_F, d_P:

$$d_F = \frac{2m_0^{1/2}}{m_2^{1/4}}\sqrt{\left(\frac{2}{\pi}\right)^{1/2} + u\exp\left(\frac{u^2}{2}\right)\operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right)};$$

$$d_P = \left(\frac{m_0}{m_2}\right)^{1/2}(1+S)\exp\left(\frac{u^2}{2}\right)\operatorname{erfc}\left(-\frac{u}{\sqrt{2}}\right),$$

де m_0, m_2, m_4 – спектральні моменти.

Досліджена залежність еквівалентних діаметрів d_F, d_P від комплексу умов контактування.

На підставі точних формул отримані розрахункові формули:

$$\frac{d_F m_2^{1/4}}{m_0^{1/2}} = \begin{cases} \left(1+\dfrac{1{,}328}{K^{1{,}08}}\right)^{0{,}545}, & (K \le 1); \\ 2{,}524\exp\left(-0{,}615K^{0{,}538}\right), & (K > 1) \end{cases};$$

$$\frac{d_P}{1+S}\left(\frac{m_2}{m_0}\right)^{1/2} = \begin{cases} \left(1+\dfrac{0{,}321}{K^{1{,}09}}\right)^{0{,}886}, & (K \le 0{,}3); \\ 2{,}992\exp\left(-1{,}353K^{0{,}703}\right), & (0{,}3 < K \le 1{,}3); \\ 1{,}134\exp\left(-0{,}521K^{0{,}636}\right), & (K > 1{,}3) \end{cases}.$$

Значення, розраховані за точною та розрахунковою формулою зведеного еквівалентного діаметру $d_F m_2^{1/4}/m_0^{1/2}$ різняться не більше, ніж на 9%, для зведеного еквівалентного діаметру $d_P(m_2/m_0)^{1/2}/(1+S)$ різниця не перевищує 10%.

Література

1. Бабкин В. Т. Герметичность неподвижных соединений гидравлических систем / Бабкин В. Т., Зайченко А. А., Александров В. В. – М. : Машиностроение, 1979. – 270 с.

2. Демкин Н.Б. Плотность стыка и объем зазора между поверхностями контактирующих деталей машин / Н.Б. Демкин // Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М. : Наука, 1971. – С. 96–101.

3. Демкин Н.Б. Расчет расхода газа через зазор, образованный плоскими волнистыми и

шероховатыми поверхностями / Н.Б. Демкин, А.А. Ланков, Р.Г. Перельман, Ю.Б. Михайлов // Надежность и долговечность деталей машин. – Калинин, 1974. – С. 55–65.

4. Калда Г.С. Разработка методов расчёта контактных перемещений и герметичности металлополимерных сопряжений с помощью модели случайного поля : дис. ... канд. техн. наук / Калда Г.С. – Хмельницкий, 1989. – 184 с.

5. Semenjuk N.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.

6. Бачинская Н.К. Исследование контактных характеристик шероховатых, сильно анизотропных повер-хностей : дис. ... канд. техн. наук / Бачинская Н.К. – Хмельницкий, 1994. – 166 с.

7. Тимощук О.Г. Розробка методів розрахунку та експериментального дослідження герметичності беззмащувальних циліндро-поршневих ущільнень : дис. … канд. техн. наук. – Хмельницький, 2003. – 386 с.

8. Макушкин А.П. Научно-технические основы создания полимерных уплотнений и узлов трения оборудования криогенных систем : дис. ... д-ра техн. наук / Макушкин А.П. – Балашиха, 1982. – 511 с.

9. Лившиц В.И. Теоретическое исследование герметичности при контакте стальных шлифованных поверхностей / В.И. Лившиц, А.Д. Домашнев // Вопросы прочности сосудов высокого давления. – № 261. – С. 103–116. – (Деп. в ЦИНТИ Химнефтемаш 16.10.75).

10. Макушкин А.П. Исследование герметичности разъемных соединений при криогенных температурах / А.П. Макушкин, И.В. Крагельский, Н.М. Михин // Трение и износ. – 1988. – № 2. – С. 197–206.

References

1. Babkin V.T., Zaichenko A.A., Aleksandrov V.V. The Hermeticity of Immobile Joints of Hydraulic-Visual Systems. - Moscow: Mechanical Engineering, 1979. - 270 p.

2. Demkin N.B. The joint density and gap volume between the surfaces of the contacting parts of ma-tires // Contact interaction of solids and calculation of friction and wear forces. - Moscow: Nauka, 1971. - P. 96 - 101.

3. Demkin N.B., Lankov A.A., Perelman R.G., Mikhailov Yu.B. Calculation of gas flow through a gap formed by flat wavy and rough surfaces // Reliability and durability of machine parts. - Kalinin, 1974. - P. 55 - 65.

4. Calda G.S. Development of methods for calculating contact displacements and tightness of metal-dimensional interfaces using a random field model: Dis. ... cand. tech. sciences. - Khmelnitsky, 1989. - 184 p.

5. Semenjuk N.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.

6. Bachinskaya N.K. Investigation of contact characteristics of rough, highly anisotropic surfaces: Dis ... kand. ... cand. tech. sciences. - Khmelnitsky, 1994. - 166 p.

7. Tymoshchuk O.G. Development of calculation methods and experimental study of tightness of non-greasy cylinder-piston seals: Dis. ... Candidate tech sciences - Khmelnitsky, 2003. - 386 p.

8. Makushkin A.P. Scientific and technical fundamentals of creating polymeric seals and friction units of cryogenic systems equipment: Dis ... Dr. techn. sciences. - Balashikha, 1982. - 511 p.

9. Livshits V.I., Domashnev A.D. Theoretical investigation of the tightness at the contact of steel polished surfaces // In: Problems of the strength of high-pressure vessels. Dep. in CINTI Chemneftemash on 16.10.75. - No. 261. - P. 103 - 116.

10. Makushkin A.P., Kragelsky I.V., Mikhin N.M. Investigation of the tightness of detachable joints at cryogenic temperatures // Friction and wear. - 1988. - №2. - P. 197 - 206.

Рецензія/Peer review : 18.9.2018 р. Надрукована/Printed : 20.9.2018 р.
Рецензент: к.т.н., проф. Кармаліта А.К.