

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.824 – 762.6:62 – 223

Похильчук І. О., к.т.н., старший викладач, Стрілець В. О., к.т.н., доцент, Тимейчук О. Ю., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

ДОСЛІДЖЕННЯ НАДІЙНОСТІ НОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ТОРЦЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ

Для заданих геометричних параметрів кільць тертя нових конструкцій торцевих ущільнень, з відведенням ущільненого середовища від пари тертя, визначено величину втрат для різних рідин та різних зазорів у парі тертя. Проведено оптимізацію втрат ущільненого середовища за трьома змінними параметрами: кутовою швидкістю кільць тертя, густиною та динамічною в'язкістю ущільненого середовища.

Ключові слова: надійність, ущільнення, параметри.

Аналіз існуючих конструкцій торцевих ущільнень показав, що вони мають суттєвий недолік: зменшення надійності герметизації рухомих з'єднань, при спрацюванні пари тертя. Для запобігання цього явища запропоновані нові конструкції торцевих ущільнень з відведенням робочого середовища від пари тертя [1-12].

Згідно **принципової схеми нових конструкцій** торцевих ущільнень з відведенням робочого середовища від пари тертя складена розрахункова схема (рис.1). Ущільнення складається з необертового кільця 1 та обертового кільця 2 на плоскій торцевій поверхні якого виконана кільцева канавка 3, яка вловлює ущільнену рідину 4, що намагається проникнути назовні. Вловлена рідина із кільцевої канавки через поздовжні осьові канали 5, розміщені під кутом до осі обертання рухомої втулки, рухається до радіальних порожнин 6, з яких, під дією відцентрової сили, відводиться назад в ущільнену порожнину.

Згідно **принципової схеми нових конструкцій** торцевих ущільнень з відведенням робочого середовища від пари тертя складена розрахункова схема (рис. 1). Ущільнення складається з необертового кільця 1 та обертового кільця 2 на плоскій торцевій поверхні якого виконана кільцева канавка 3, яка вловлює ущільнену рідину 4, що намагається проникнути назовні. Вловлена рідина із кільцевої канавки через поздовжні осьові канали 5, розміщені під кутом до осі обертання

рухомої втулки, рухається до радіальних порожнин 6, з яких, під дією відцентрової сили, відводиться назад в ущільнену порожнину.

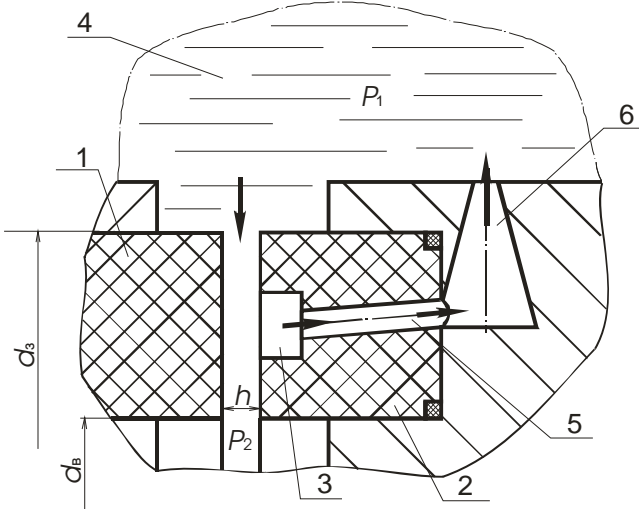


Рис. 1. Розрахункова схема до дослідження втрат ущільненого середовища через стик пари тертя нових конструкцій торцевих ущільнень
 1 – необертове кільце тертя; 2 – обертове кільце тертя; 3 – кільцева канавка;
 4 – ущільнене середовище; 5 – осьовий канал; 6 – радіальна порожнина

Визначення втрат ущільненого середовища через стик пари тертя, для випадку, коли одне із кілець обертається, проводилось за залежністю [13-15]:

$$q_1 = \frac{\pi h^3}{6\eta_p \ln \frac{d_3}{d_6}} \left[0,0375 \rho \omega^2 (d_3^2 - d_6^2) - (p_1 - p_2) \right], \quad (1)$$

де p_1 – тиск ущільненого середовища (на вході торцевого ущільнення); p_2 – тиск на виході з торцевого ущільнення; d_3 – зовнішній діаметр кільця; d_6 – внутрішній діаметр кільця; h – величина зазору між кільцями; η_p – динамічна в'язкість рідини; ω – кутова швидкість кільця, що обертається; ρ – густина рідини (ущільненого середовища).

Дослідження втрат проводилось для різних рідин при таких параметрах: $p_1 = 6 \text{ МПа}$; $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$; $d_3 = 150 \text{ мм}$; $d_6 = 120 \text{ мм}$; $\omega = 157,08 \text{ рад/с}$.

Таблиця 1

Величини втрат ущільненого середовища через стик пари тертя

Рідина	ρ , кг/м ³	Витрата (q_1 , л/год) при зазорі в стикі пари тертя (h , мкм)			η_p , кг·с/м ²
		0,5	5	50	
		бензин	750	0,002766	
нафта	900	0,000015	0,015	15,3	0,13
вода	1000	0,001911	1,911	1910,9	0,001
гліцерин	1250	0,000002	0,002	2,5	0,77

Для оптимізації втрат ущільненого середовища через стик пари тертя нами було розв'язано задачу з відшукування екстремуму (найбільшого або найменшого значення) скалярної функції $f(x)$ n -вимірного аргументу (вектор – стовпець або точка в n -вимірному векторному просторі) [16]:

$$\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T. \quad (2)$$

Функцію $f(\vec{x})$, яку оптимізують, називають *цільовою функцією* або *критерієм оптимальності*. Вектор \vec{x}^* , який надає мінімуму цільовій функції називається *оптимальним*. Задачу мінімізації можна звести до задачі на максимізацію, тобто $\min(f(\vec{x})) = -\max(-f(\vec{x}))$.

Для розв'язку було визначено *градієнт* диференційованої функції $f(\vec{x})$ в точці $\vec{x}^{(0)}$: n -вимірний вектор $f'(\vec{x}^{(0)})$ компонентами якого є часткові похідні функції $f(\vec{x})$, які обчислені в точці $\vec{x}^{(0)}$

$$\text{grad } f(\vec{x}^{(0)}) = f'(\vec{x}^{(0)}) = \left(\frac{\partial f(\vec{x}^{(0)})}{\partial x_1}, \frac{\partial f(\vec{x}^{(0)})}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial f(\vec{x}^{(0)})}{\partial x_n} \right). \quad (3)$$

На властивостях градієнта базуються методи 1-го порядку, або *градієнтні методи*, з допомогою яких можна визначити точку локального мінімуму функції багатьох змінних. Ці методи зводяться до знаходження послідовності векторів $[\vec{x}^{(k)}]$, для яких виконується умова монотонності спадання функції

$$f(\vec{x}^{(0)}) > f(\vec{x}^{(1)}) > f(\vec{x}^{(2)}) > \dots > f(\vec{x}^{(n)}). \quad (4)$$

З початкової точки $\vec{x}^{(0)}$ в точку $\vec{x}^{(1)}$ найкраще перейти в напрямку

антиградієнта. В результаті отримуємо ітераційний процес, що описується формулою

$$\bar{x}^{(k+1)} = \bar{x}^{(k)} - h_k f'(\bar{x}^{(k)}). \quad (5)$$

Критерієм закінчення ітераційного процесу є одна з двох умов:

$$|\bar{x}^{(k+1)} - \bar{x}^{(k)}| \leq \varepsilon, \quad (6)$$

$$\left| \text{grad } f(\bar{x}^{(k+1)}) \right| = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f(\bar{x}^{(k+1)})}{\partial x_i} \right]^2} \leq \varepsilon, \quad (7)$$

де ε – дуже мала величина.

Залежно від способу вибору кроку h_k градієнтні методи поділяються на *методи з постійним кроком* та *методи із змінним кроком*. При використанні методів з постійним кроком для знаходження мінімуму функції, якщо крок дуже малий, то необхідно виконувати велике число ітерацій, а збільшення кроку може призвести до зростання значень функції або до коливань біля точки мінімуму (зацикловання). Тому на практиці методи з постійним кроком використовуються дуже рідко. Більш надійні та економічні градієнтні методи із змінним кроком.

До методів із змінним кроком належать *метод найшвидшого спуску* та *метод поділу кроку*.

При використанні методу найшвидшого спуску при кожній ітерації величина кроку h_k вибирається з умови мінімуму функції $f(\bar{x})$ в напрямку спуску, тобто

$$f(\bar{x}^{(k)} - h_k f'(\bar{x}^{(k)})) = \min_{h \geq 0} f(\bar{x}^{(k)} - h \cdot f'(\bar{x}^{(k)})). \quad (8)$$

Тобто, при кожній ітерації необхідно визначати величину кроку h_k з допомогою одновірної оптимізації по h функції:

$$\varphi(h) = f(\bar{x}^{(k)} - h \cdot f'(\bar{x}^{(k)})). \quad (9)$$

Процес відшукування мінімуму продовжується до виконання умов (6) або (7).

При використанні *методу поділу кроку* на кожному кроці перевіряється умова монотонності спадання функції (4) і, якщо ця умова не виконується, то лише тоді величину кроку ділять навпіл доти, доки не буде виконуватись ця умова. Процес відшукування мінімуму продовжується до виконання умов (6) або (7).

Для нашого випадку знайдемо мінімум функції трьох змінних

Таблиця 2

Вибіркові дані для побудови залежності $q_1 = f(\mu_p)$ при різних ω і ρ

n	$\omega = 100 \text{ рад/с},$ $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$		$\omega = 450 \text{ рад/с},$ $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$		$\omega = 100 \text{ рад/с},$ $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$		$\omega = 450 \text{ рад/с},$ $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$		$\omega = 275 \text{ рад/с},$ $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$	
	$\eta_p, \text{ кг}\cdot\text{с/м}^2$	$q_1,$ г/добу	$\eta_p,$ $\text{кг}\cdot\text{с/м}^2$	$q_1,$ г/добу	$\eta_p,$ $\text{кг}\cdot\text{с/м}^2$	$q_1,$ г/добу	$\eta_p, \text{ кг}\cdot\text{с/м}^2$	$q_1,$ г/добу	$\eta_p, \text{ кг}\cdot\text{с/м}^2$	$q_1,$ г/добу
0	0,000500	98,53	0,000500	4489,24	0,000500	221,69	0,000500	1995,22	0,000500	1164,26
20	0,000826	59,64	0,002482	904,34	0,000923	120,07	0,002139	466,37	0,001646	353,69
40	0,000998	49,34	0,003052	735,57	0,001128	98,28	0,002647	376,92	0,002044	284,74
60	0,001125	43,77	0,003462	648,39	0,001277	86,83	0,003009	331,49	0,002328	250,07
80	0,001229	40,09	0,003792	591,90	0,001397	79,36	0,003301	302,25	0,002555	227,86
100	0,001317	37,41	0,004073	551,08	0,001499	73,95	0,003548	281,21	0,002747	211,90
120	0,001395	35,32	0,004320	519,63	0,001589	69,76	0,003764	265,03	0,002916	199,65
140	0,001465	33,64	0,004541	494,33	0,001670	66,39	0,003958	252,04	0,003067	189,83
160	0,001528	32,23	0,004742	473,33	0,001743	63,59	0,004135	241,27	0,003204	181,69
180	0,001587	31,04	0,004928	455,51	0,001811	61,20	0,004298	232,14	0,003330	174,79
200	0,001642	30,00	0,005100	440,10	0,001874	59,14	0,004449	224,25	0,003448	168,83
220	0,001693	29,09	0,005262	426,59	0,001933	57,34	0,004590	217,33	0,003558	163,61
240	0,001742	28,28	0,005414	414,60	0,001989	55,73	0,004724	211,20	0,003662	158,99
260	0,001788	27,56	0,005558	403,85	0,002042	54,29	0,004850	205,71	0,003760	154,84
280	0,001831	26,90	0,005695	394,14	0,002092	52,99	0,004970	200,74	0,003853	151,10

$$q_1(\rho, \omega, \mu_p) = \frac{\pi h^3}{6\mu_p \ln \frac{d_3}{d_6}} [0,0375 \rho \omega^2 (d_3^2 - d_6^2) - (p_1 - p_2)]. \quad (10)$$

Нехай $p_1 = p_2$; $a = \frac{d_3}{d_6}$; $b = d_3^2 - d_6^2$, тоді

$$q_1(\rho, \omega, \mu_p) = \frac{0,0375 \pi h^3 b}{6\mu_p \ln a} \cdot \frac{\rho \omega^2}{\mu_p}. \quad (11)$$

Обчислення проводились з кроком $h = 10^{-9} \text{ м}^3 / \text{с}$ для різних вихідних даних: $\omega = 100 - 450 \text{ рад} / \text{с}$, $\rho = 750 - 1250 \text{ кг} / \text{м}^3$, $\varepsilon = 0,22 - 0,59$.

Оскільки при дослідженні було отримано дуже багато даних, то для побудови графіка залежності $q_1 = f(\eta_p)$ використаємо вибірккові дані наведені в табл. 2.

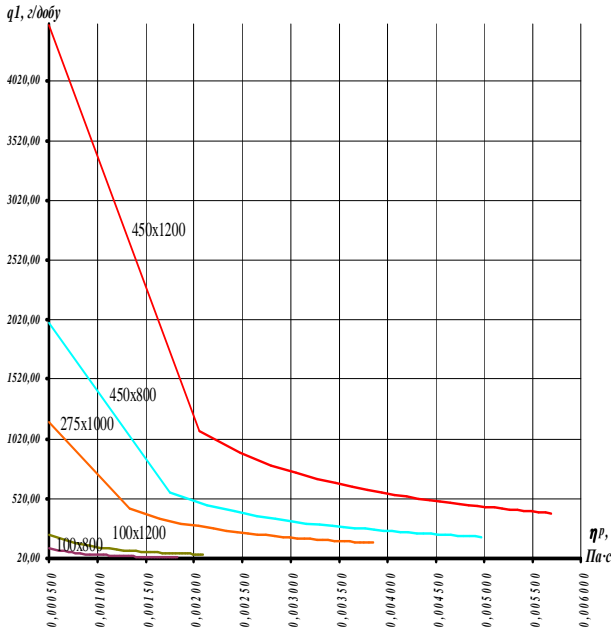


Рис. 2. Графік залежності витрат ущільненого середовища через стик пари тертя від динамічної її в'язкості

Результати оптимізації параметрів нових конструкцій торцевих ущільнень з відведенням ущільненого середовища від пари тертя, представлені на рис. 2, показали, що втрати рідини зменшуються при збільшенні її динамічної в'язкості, а найбільш оптимальним є їх застосування для рідин динамічна в'язкість лежить в межах 0,0045-0,0055 Па·с.

1. Пат. 41521 Україна, МПК F16J15/34. Торцеве ущільнення / В. М. Стрілець, М. А. Смалько, Л. К. Буняк, І. О. Похильчук. – у 98126558; заявл. 11.12.1998; опубл. 15.08.2003, Бюл. № 8. **2.** Пат. 49276 Україна, МПК F16J15/34. Торцеве ущільнення / В. М. Стрілець, І. О. Похильчук, Л. К. Буняк. – у 2001106922; заявл. 11.10.2001; опубл. 15.06.2004, Бюл. № 6. **3.** Пат. 52228 Україна, МПК F16J15/34. Торцеве ущільнення / В. М. Стрілець, І. О. Похильчук. – у 2002032245; заявл. 21.03.2002; опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2. **4.** Пат. 53851 Україна, МПК F16J15/34. Торцеве ущільнення / В. М. Стрілець, І. О. Похильчук, Л. К. Буняк. – у 2001107265; заявл. 25.10.2001; опубл. 15.07.2004, Бюл. № 7. **5.** Пат. 61743 Україна, МПК F16J15/34. Торцеве ущільнення / В. М. Стрілець, І. О. Похильчук, В. М. Василюк, С. І. Крицін. – у 2003043214; заявл. 10.04.2003; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6. **6.** Пат. 64252 Україна, МПК F16J15/34. Торцеве ущільнення / В. М. Стрілець, І. О. Похильчук, В. М. Василюк, С. І. Крицін. – у 2003043509; заявл. 18.04.2003; опубл. 15.06.2005, Бюл. № 6. **7.** Пат. 2118729 РФ, МПК F16J15/34. Торцовое уплотнение / В. Н. Стрелец, М. А. Смалько, Л. К. Буняк, И. А. Похильчук. – у 96110550; заявл. 27.05.1996; опубл. 10.09.1998, Бюл. № 25. **8.** Пат. 2140031 РФ, МПК F16J15/34. Торцовое уплотнение / В. Н. Стрелец, М. А. Смалько, П. Ф. Завгородний, Л. К. Буняк, И. А. Похильчук. – у 98106827; заявл. 13.04.1998; опубл. 20.10.1999, Бюл. № 25. **9.** Пат. 2145020 РФ, МПК F16J15/34. Торцовое уплотнение / В. Н. Стрелец, М. А. Смалько, П. Ф. Завгородний, Л. К. Буняк, И. А. Похильчук. – у 98117204; заявл. 16.09.1998; опубл. 27.01.2000, Бюл. № 3. **10.** Пат. 2204753 РФ, МПК F16J15/34. Торцовое уплотнение / В. Н. Стрелец, И. А. Похильчук, Л. К. Буняк, М. А. Смалько, П. Ф. Завгородний. – у 2000104789; заявл. 28.02.2000; опубл. 20.05.2003, Бюл. № 15. **11.** Пат. 2260729 РФ, МПК F16J15/34. Торцовое уплотнение / В. Н. Стрелец, И. А. Похильчук, В. М. Василюк, С. И. Крицын. – у 2003118011; заявл. 16.06.2003; опубл. 20.09.2005, Бюл. № 27. **12.** Пат. 2260730 РФ, МПК F16J15/34. Торцовое уплотнение / В. Н. Стрелец, И. А. Похильчук, В. М. Василюк, С. И. Крицын. – у 2003130664; заявл. 14.10.2003; опубл. 20.09.2005, Бюл. № 27. **13.** Голубев А. И. Торцовые уплотнения вращающихся валов / А. И. Голубев. – М. : Машиностроение, 1974. – 212 с. **14.** Контактные уплотнения вращающихся валов / [Г. А. Голубев и др.]; под ред. А. В. Чичинадзе. – М. : Машиностроение, 1976. – 264 с. **15.** Майер Э. Торцовые уплотнения / Эдгар Майер; пер с нем. – М. : Машиностроение, 1976. – 288 с. **16.** Самарский А. А. Методы решения сеточных уравнений / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. – М. : Наука, 1978 г. – 269 с.

Рецензент: к.т.н., доцент Лук'янчук О. П. (НУВГП)

**Pohylchuk I. A., Candidate of Engineering, Senior Lecturer,
Strilets V. O., Candidate of Engineering, Associate Professor,
Tymeychuk O. Y., Candidate of Engineering, Associate Professor**
(National University of Water Management and Nature Resources Use,
Rivne)

RESEARCH OF NEW STRUCTURES RELIABILITY OF MECHANICAL SEALS

The amount of loses in different liquids is estimated for given geometric parameters of friction rings of new constructions with drawl of stream free friction. Optimization of loses of the environment is provided by three parameters: angel speed of ring of frictions, density and dynamic viscosity of the environment.

Keywords: reliability, seals, parameters.

Похильчук И. А., к.т.н., старший преподаватель, Стрилец В. А., к.т.н., доцент, Тимейчук О. Ю., к.т.н., доцент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ НОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТОРЦЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Для приведенных геометрических параметров колец трения новых конструкций торцевых уплотнений, с отведением уплотненной среды от пары трения, определена величина потерь для разных жидкостей и различных зазоров в паре трения. Проведена оптимизация потерь уплотненной среды по трем переменным параметрам: угловой скоростью колец трения, плотностью и динамической вязкостью уплотненной среды.

Ключевые слова: надежность, уплотнения, параметры.
