

УДК 62-762(035)

## ВИЗНАЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ УЩІЛЬНЕНЬ ПРИ ЗВОРОТНО-ПОСТУПАЛЬНОМУ РУХУ

Андренко П.М., д.т.н.,

Національний технічний університет

“Харківський політехнічний інститут”

Свинаренко М.С., к.т.н.

Харківський національний університет архітектури та будівництва

Тел. (057) 707-61-28

**Анотація** – в статті наведені результати експериментальних досліджень довговічності різних типів ущільнень при зворотно-поступальному руху. Розроблена методика визначення їх ресурсу, терміну служби і кількості циклів роботи.

**Ключові слова** – ущільнення, зворотно-поступальний рух, довговічність, ресурс, кількість циклів.

*Постановка проблеми.* Ущільнення є одним з основних елементів гідрофікованих машин та гідроагрегатів (ГА), від яких в значній мірі залежить їх надійність, технічний рівень та конкурентоспроможність. В той же час вони є найбільш слабкою ланкою гідравлічних елементів та пристроїв, при виході з ладу яких гідравлічні елементи і ГА втрачають працездатність, що може привести в окремих випадках до аварії. Як вказує досвід експлуатації гідрофікованих машин та ГА, потреба в розбиранні вузла для заміни зношених деталей значною мірою визначається станом та зношенням ущільнення. Слід зазначити, що механізм ущільнюючої дії зазвичай обумовлений не тільки механічною взаємодією поверхонь які контактують, а також процесами тертя в зоні контакту та хімічними процесами матеріалу в процесі експлуатації при контакті з різними середовищами.

Однією з великих груп ущільнень є ущільнення для герметизації при зворотно-поступальному руху. Серед таких ущільнень значне місце займають контактні (манжети, кільця, сальники тощо), які здійснюють герметизацію за рахунок щільного притискання ущільнення до відповідної сполученої поверхні. При роботі контактних ущільнень відбувається зношення сполучених з ними деталей: валів, штоків і циліндрів. Це приводить до збільшення витоків робочої рідини (РР), значення яких регламентовано відповідними ДСТУ, зменшення ККД та може привести до втрати ГА роботоспроможності. Визначення дов-

говічності таких ущільнень внаслідок складних фізико-хімічних процесів, що протікають в них, натрапляє на великі труднощі та потребує проведення значних об'ємів експериментальних досліджень. На сьогодні відсутні єдині методологічні підходи, що до визначення довговічності таких ущільнень.

*Аналіз останніх досліджень.* Визначення довговічності ущільнень базується на роботах Абрамова Є.І., Аврущенко Б.Х., Свешнікова В.К., Макарова В.Г. та ін. При роботі ГА намінеральних мастилах на основі нафти, вогнестійких гідравлічних рідинах, прісній воді та ін., вибір ущільнень для герметизації з'єднань здійснюється відповідно до рекомендацій, наведених у [1]. Там же наведені конструкція та розміри ущільнень, а також місця для їх посадки. Вимоги щодо монтажу таких ущільнень наведені у роботі [2]. За даними роботи [3] температура РР у об'ємних ГА з водяним охолодженням знаходиться в межах 50...60 °С, а з повітряним 70...80 °С, тому далі будемо розглядати роботу ущільнень при температурі більш ніж 50 °С.

Аналіз літературних джерел дозволив встановити, що довговічність ущільнень значною мірою залежить від місць посадки ущільнень, чистоти обробки поверхні ковзання, її твердості. Залежність довговічності від вказаних факторів досить складна, а аналітичні залежності, які її описують, відсутні. Тому далі вважаємо, що місця посадки ущільнень, чистота обробки поверхні ковзання та її твердість відповідають технічним умовам наведеним у відповідних ДСТУ, і їх вплив на довговічність не розглядаємо. В якості параметрів довговічності в літературних джерелах розглядаються: ресурс  $L$  або час експлуатації, термін служби, кількість циклів  $N$ .

В роботі [4] при розгляді довговічності гумових манжет при експлуатації в маслі АМГ-10 при температурі 20 °С встановлено, що при збільшенні модуля гуми з одного того ж каучуку у 2 рази довговічність манжети зростає у 12 разів, та довжина ходу не впливає на неї. Головним фактором, який впливає на довговічність ущільнень при зворотно-поступальному руху, є кількість реверсів, тобто кількість передеформацій ущільнювача внаслідок зміни знака сили тертя. При цьому втрата герметичності ущільнювачем відбувається внаслідок руйнування матеріалу від втоми. Кількість циклів  $N$  до руйнування гуми при динамічному навантаженні визначається за формулою [4]

$$N = \nu B(b+1)\sigma^{-b}, \quad (1)$$

де  $\nu = 1/\tau$  – частота навантаження;  $\tau$  – період циклу навантаження;  $\sigma$  – напруження, яке руйнує;  $B$  – константа, яка залежить від масштабного фактора (товщини зразка, який руйнується);  $b$  – константа, яка залежить від жорсткості зразка та для технічних гум знаходиться в межах від 3 до 12, зростаючи разом з зростанням жорсткості.

З (1) видно, що при збільшенні періоду навантаження, зменшується кількість циклів до руйнування матеріалу манжет. При цьому характерними руйнуваннями, які приводять до втрати герметичності манжет при зворотно-поступальному руху, є: вирив; зношення ущільнюючої поверхні у вигляді рисок у напрямку руху; тріщин в місці переходу від робочої частини манжети до опорної; руйнування ущільнюючої кромки. Зазначено, що при роботі манжет у статичному режимі втрата герметичності відбувається при деякому критичному значенні контактної сили  $F_{к\ кр}$  на одиницю довжини. За результатами експериментів встановлено, що  $F_{к\ кр} = 2$  Н [4]. При циклічному навантаженні втрата герметичності може настати і при більш високих значеннях контактної напруженості в результаті руйнування манжети. До формули (1) входять константи, які невизначені для більшої кількості ущільнень, тому її використання обмежено.

У роботі [4] також наведено методику прогнозування довговічності манжет, однак вона базується на їх короткочасних експериментальних дослідженнях на спеціальному приборі і не може бути застосована для широкого класу ущільнень.

Розглядаючи довговічність гумових ущільнень при зворотно-поступальному руху у роботі [5], відповідно до експериментальних даних, встановлено, що характер зміни довговічності (кількості циклів  $N$ , після яких відбувається руйнування ущільнення) залежно від робочого тиску  $PP$   $p$  нагадує характер кривих витривалості для металів у координатах  $\sigma_{оп}$ ,  $N$ , де через  $\sigma_{оп}$  означається граничне напруження. Приймають, що коефіцієнт асиметрії циклу  $r = \sigma_{min}/\sigma_{max}$  є постійним для даної конструкції ущільнення та не залежить від тиску  $p$ , та

$$p_{оп}^m N = const . \quad (2)$$

Цю залежність розповсюджують на весь діапазон циклів, який є при роботі ущільнень. Допустимий при даній довговічності ущільнення тиск, який враховує зміну діаметрів поверхонь, які ущільнюються, і чистоту їх обробки визначають з залежності [5]

$$[p] = p_{оп} \varepsilon \beta / [n], \quad (3)$$

де  $p_{оп}$  – граничний тиск, знятий з кривої довговічності при  $d = 70$  мм і чистоті обробки поверхні, яка ущільнюється  $\nabla 7 \dots \nabla 8$ ;  $\varepsilon$  – коефіцієнт, який враховує вплив на довговічність зміни діаметра ущільнюючої поверхні (при  $d = 70$  мм  $\varepsilon = 1$ );  $\beta$  – коефіцієнт, який враховує вплив на довговічність чистоти обробки (при  $\nabla 7 \dots \nabla 8$   $\beta = 1$ );  $[n]$  – коефіцієнт запасу.

Приблизне значення показника  $m$  в формулі (2) для різних гумових ущільнень,  $m \approx 3$ . При значенні коефіцієнта запасу  $[n] = 2$  допустимий, при даній довговічності ущільнення, тиск  $[p] = 3 \dots 10$  МПа.

Якщо при роботі ущільнення тиск  $p$  змінюється, то приблизне сумування напружень втоми визначається з приведеної кількості циклів  $N_{\text{пр}}$ , яка відповідає основному режиму при тиску  $p_1$ :

$$p_1^m N_1 + p_2^m N_2 + \dots = p_1^m N_{\text{пр}}. \quad (4)$$

З (4) визначають приведену кількість циклів, яка відповідає тиску  $p_1$ :

$$N_{\text{пр}} = N_1 + N_2 (p_2/p_1)^m + N_3 (p_3/p_1)^m + \dots. \quad (5)$$

Однак і ці аналітичні залежності не дозволяють визначити довговічність ущільнень при зворотно-поступальному руху. В каталогах провідних вітчизняних та закордонних фірм відсутня інформація щодо довговічності ущільнень [6 – 8]. Таким чином, на сьогодні відсутні науково обґрунтовані методики визначення довговічності ущільнень при зворотно-поступальному руху, а їх розробка є актуальною науково-практичною задачею.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Розробка методики визначення довговічності ущільнень при зворотно-поступальному руху.

*Основна частина.* При встановленні довговічності ущільнень при зворотно-поступальному руху спираємося на дані експериментальних досліджень, наведених в літературних джерелах [4 – 6, 9 – 12], які екстраполюємо, враховуючи форму ущільнення, матеріал, з якого вони виготовлені, температуру і тиск у ГА, швидкість ковзання тощо.

В якості кільцевих ущільнень при зворотно-поступальному руху найбільш широко використовуються гумові кільця круглого, овального,  $x$ -подібного та пилкоподібного перетинів. Для кілець круглого перетину ресурс за шляхом ковзання  $L$  не перевищує 100 км. Такий самий ресурс досягають кільця овального перетину. Кільця пилкоподібного перетину при високій якості ущільнюючих поверхонь при тиску  $p < 0,15$  МПа, швидкості ковзання  $v < 3$  м/с та температурі  $T = -5 \dots 60^\circ\text{C}$ , забезпечують необхідну герметичність при кількості подвійних ходів  $N(5 \dots 7) 10^6$  [9].

Гарантійне напрацювання для гумових кілець круглого перетину при зворотно-поступальному руху становить 3 км, та залежить від групи гуми температури і тиску [10]. Зазначимо, що марка гумизалежить від її щільності та наведена там же.

Ущільнення з фторопласту-4, фторопласту-40, поліаміду 610 і капралона використовуються при  $p > 6,3$  МПа. Вони забезпечують мінімальну силу тертя, плавність руху та працездатність ущільнень без змащувального матеріалу у широкому діапазоні температур та практично не старіють при роботі і зберіганні на протязі до 20 років. Слід зазначити, що ресурс фторопластових ущільнень рухомих з'єднань (кільце яке плаває з браслетними пружинами) при тиску  $p = 32$  МПа і роботі на мастилi типа МГЕ-10 становить більш ніж 200 км, та може

*Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва*

бути суттєво збільшений за рахунок заміни кілець з фторопласту-4 кільцями з композицій, які наповнюють його. Термін експлуатація таких ущільнень становить 20 років [9].

Для фторопластових кілець, виконаних за ГОСТ 17820-72 з фторопласту-4 для герметизації штоків діаметрів від 8 до 16 мм, які працюють при: тиску  $p \leq 6,3$  МПа; швидкості ковзання  $v < 0,015$  м/с; температурі  $T = -50 \dots +225$  °С; залежно від діаметра, гарантійний ресурс  $N$  становить  $10^5$ ,  $L = 50 \dots 200$  км [9]. На рис. 1 наведено діаграми довговічності для діаметрів штока і поршня  $d = 70$  мм при  $v_{\max} \approx 0,6$  м/с.

Фірма Елконт спеціалізується на виготовленні ущільнень та опорних кілець гідроциліндрів стандартних діаметрів від 20 до 250 мм, що працюють у середовищі мінеральних мастил і водно масляних емульсій з чистотою не грубіше 14 класу згідно ГОСТ 17216, в'язкістю  $12 \dots 1500$  мм<sup>2</sup>/с. Основні матеріали ущільнень та параметри, при яких їх використання ефективно, наведені у роботі [6]. Робоча температура, залежно від матеріалу, становить від  $-60$  до  $+250$ °С, швидкість ковзання від 0,5 до 10 м/с, робочий тиск до 80 МПа. Середній контактний тиск визначається з залежностей: для поршня  $\sigma = F/(DB)$  або  $\sigma = F/(dB)$  для штока, де  $F$  – радіальне навантаження;  $D$  і  $d$  – відповідно діаметри поршня і штока;  $B$  – ширина кільця.

Основними ущільнюючими елементами при зворотно-поступальному русі є манжети, які забезпечують малу, порівняно з гумовими кільцями, силу контактної тертя і великий ресурс. Однак їх застосовують парами та дублюють іншими ущільненнями для виключення підсмоктування повітря. Для гідравлічних манжет, виконаних за ГОСТ 14896-84 (манжети 1 і 3 типів) для  $D$  і  $D_c$  до 500 мм, які використовуються в автомобілях, тракторах, дорожніх і сільськогосподарських машинах гарантійний термін експлуатації, умови застосування та загальний ресурс наведено у табл. 1. При застосуванні таких манжет в інших виробках попередня гарантія 2 роки для  $L = 5$  км, а гарантійний термін зберігання 2 роки з часу виготовлення [9].

95 % ресурс гумових армованих манжет для валів залежно від групи, становить не менше: 3000 год. для 1...3 групи (трактори, пароплави); 5000 год. – 6 група; 2500 год., залежно від групи гуми [11].

Таблиця 1 – Характеристики і умови застосування гідравлічних манжет виготовлених за ГОСТ 14896-84

Група гуми	Діапазон робочих температур, °С	$p_{\max}$ , МПа	Ресурс, діб, при $T$ , °С		
			50	70	100
0	-10 ...+ 200	32	–	–	2,5 роки*
1	-10 ...+ 150		–	–	2,5 роки**
2а	-30 ...+ 100		40	7	5/6
2б	-10 ...+ 100	50	–	400	28
4	-30 ...+ 100	32	30	6	2/3
2	-2 ...+ 70	20	10	1	–
2а			25	5	–
5			90	24	–
2б			150	50	–
3	-2 ...+ 70	63	80	15	–
6	-60 ...+ 100	50	45	8	2

\*Або рік при  $T < 120$  °С, або 80 діб при  $T < 150$  °С, або 300 год при  $T < 200$  °С.

\*\*Або 220 діб при  $T < 120$  °С, або 40 діб при  $T < 150$  °С.

Примітка: термін служби манжет співпадає з загальним ресурсом.

Для гумових манжет, виконаних відповідно ГОСТ 14896 для роботи при тиску до 50 МПа (типи 1 і 3) або до 32 МПа (тип 2), у яких швидкість зворотно-поступального руху не перевищує 0,5 м/с, встановлений термін служби при температурі до +70°С становить 10 років. Причому при збільшенні температури термін служби стрімко зменшується (для групи 0 при 100°С – 2,5 роки; при 120°С – 1 рік; при 150°С – 80 діб; при 200°С – 300 год.) [11].

У діапазоні тиску у ГА 10...50 МПа при додатних температурах ресурс  $U$ -подібних манжет за сумарним шляхом ковзання знаходиться у межах 30...100 км і 15...80 км у випадку роботи при додатних і від'ємних температурах. Ресурс підвищується (в цих межах) з зменшенням тиску і збільшенням діаметра ущільнення [12]. Гарантійні терміни експлуатації  $U$ -подібних манжет наведено в табл. 2 [12]. Вказані терміни експлуатації забезпечуються, якщо довжина хода вузлів та виробів не перевищує 2 м.

У роботі [4] розглядається вплив експлуатаційних факторів на роботоспроможність машин. Встановлено, що з зростанням тиску у ГА величина витоків монотонно зростає (допустима норма витоків робочого середовища становить  $0,5 \text{ см}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$ ) та стабілізується при великому тиску. При цьому відповідно зростає сила тертя ущільнення і зменшується його довговічність, яка характеризується кількістю ци-

клів до досягнення допустимої норми витоків. Довговічність ущільнення зменшується при підвищенні температури РР, частоти реверсу та збільшенням діаметра ущільнення. Встановлено, що при збільшенні модуля гуми з одного того ж каучуку у 2 рази довговічність манжети зростає у 12 разів. Зазначимо, що довжина ходу не впливає на довговічність манжет. Головним фактором, який впливає на довговічність ущільнень при зворотно-поступальному руху є кількість реверсів, тобто кількість передеформацій ущільнювача внаслідок зміни знака сили тертя. При цьому втрата герметичності ущільнювачем відбувається внаслідок руйнування матеріалу від втоми.

Таблиця 2 – Гарантійний термін експлуатації *U*-подібних манжет зменшеного перетину

Група гуми	Температура експлуатації, °С				
	до 50	до 70	до 100	до 130	до 150
1	4 роки	2 роки	1 рік	30 діб	15 діб
2	20 діб	8 діб	1 доба	–	–
3	1 рік	5 місяців	–	–	–
4	5 місяців	25 діб	3 доби	–	–
5	1 рік	35 діб	7 діб	–	–
6	3 місяці	18 діб	2 доби	–	–

На рис. 2 наведені значення контактних зусиль на одиницю довжини за відповідну кількість циклів зворотно-поступального руху.

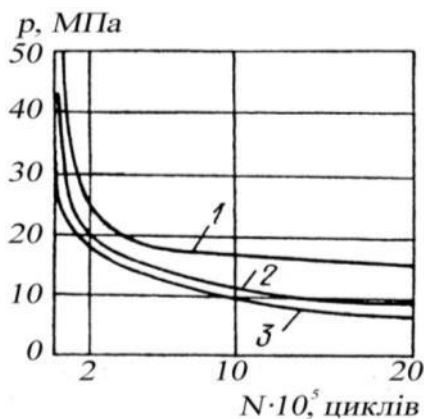


Рис. 1. Зміна довговічності ущільнення залежно від тиску РР:

- 1 – малогабаритна манжета;
- 2 – манжета (ГОСТ 6969-54);
- 3 – кілець круглого перетину.

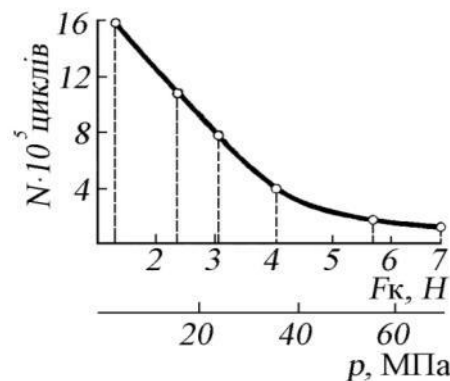


Рис. 2. Співвідношення кількості циклів до досягнення витоків  $0,5 \text{ см}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$  і величини контактної сили на одиницю довжини залежно від робочого тиску

Гумовотканеві матеріали використовуються для шевронних манжет, для яких є характерними підвищена стійкість до зношення, антиекструзійна стійкість, більш великі допустимі значення швидкості та тиску. Гумовотканеві манжети для гідравлічних пристроїв, виконаних за ГОСТ 22704-77, що використовуються для герметизації штоків гідроциліндрів діаметром від 8 до 2000 мм, швидкість переміщення яких  $v \leq 3$  м/с, тиск у ГА становить  $p \leq 63$  МПа, які працюють при температурі  $-50...+100$  °С на мінеральних мастилах, нафті, воді, водних емульсіях, гарантійний ресурс, залежно від  $p$  і  $v$ , досягає 2000...14000 км, а термін експлуатації 5 років [9].

*Методика визначення запасів працездатності ущільнень зворотно-поступального руху.* Вона складається з наступної послідовності дій:

1. Аналізують умови роботи ущільнення. Визначають: геометричні розміри ущільнюючих поверхонь; рівень тиску у ГА; діапазон робочих температур; швидкість ковзання.

2. За даними пункту 1 знаходять дані щодо працездатності ущільнень, а саме ресурс  $L$  або час експлуатації, термін служби, кількість циклів  $N$ . Для знаходження терміну експлуатації використовуються дані з табл. 1 і 2, а кількість циклів  $N$  визначають з графіків, наведених на рис. 1 і 2 залежно від тиску ГА.

3. У разі відсутності в таблицях і графіках прямих даних щодо працездатності ущільнень проводять екстраполяцію, або використовують дані наведені вище.

Найбільш перспективним напрямком є застосування ущільнень, виконаних з сучасних полімерних матеріалів, наприклад таких, як у [7].

*Висновки.* Розроблена методика визначення запасів працездатності ущільнень зворотно-поступального руху, яка базується на експериментальних даних, взятих з літературних джерел, та дозволяє орієнтовно визначити ресурс або час експлуатації, термін служби та кількість циклів таких ущільнень.

#### Література:

1. Гидроприводы объемные, пневмоприводы и смазочные системы. Выбор, монтаж и эксплуатация уплотнений. РТМ2 А50-1-82. – М. : НИИмаш, 1982. – 112 с.

2. *Финкельштейн З.Л.* Эксплуатация гидравлического оборудования: Учеб. пособ. / З.Л.Финкельштейн. – Алчевск: ДонГТУ, 2008. – 123 с.

3. *Свешников В.К.* Станочные гидроприводы: Справочник / В.К. Свешников, А.А. Усов. – М. : Машиностроение, 1988. – 512 с.



4. Аврущенко Б.Х. Резиновые уплотнители / Б.Х. Аврущенко. Л.: Химия, 1978. – 136 с.
5. Макаров В.Г. Уплотнительные устройства / В.Г. Макаров. – Л.: Машиностроение, 1973. – 232 с.
6. Свешников В.К. Гидрооборудование: международный справочник. Книга 3. Вспомогательные элементы гидропривода: Номенклатура, параметры размеры, взаимосвязь / В.К. Свешников. ООО «Издательский центр «Техинформ» МАИ», 2003. – 445 с.
7. Уплотняющие элементы: Каталог [Электронный ресурс] / ООО Геннлих Украина. – Режим доступа: [www.hennlich.com.ua](http://www.hennlich.com.ua)
8. Energychains. Hennlich[Электронный ресурс] / ООО Геннлих Украина. – Режим доступа: [www.igys.com.ua](http://www.igys.com.ua)
9. Уплотнение и уплотнительная техника: Справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер и др.; Под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. – М.: Машиностроение, 1986. – 464 с.
10. ГОСТ 18829-73. Кольца резиновые уплотнительные круглого сечения для гидравлических и пневматических устройств.
11. ГОСТ 8752-79. Манжеты резиновые армированные для разных отраслей.
12. Абрамов Е.И. Элементы гидропривода. Справочник: / Е.И. Абрамов, К.А. Колисниченко, В.Т. Маслов. – К.: Техника, 1977. – 320 с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ УПЛОТНЕНИЙ ПРИ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ

Андренко П.Н., Свинаренко М.С.

**Аннотация**– в статье приведены результаты экспериментальных исследований долговечности различных типов уплотнений при возвратно-поступательном движении. Разработана методика определения их ресурса, срока службы и количество циклов работы.

## DEFINITION OF DURABILITY IN SEALS WITH THE RECIPROCATING MOTION

P. Andrenko, M. Svinarenko

### *Summary*

The article presents the results of experimental studies of different types of seals durability with the reciprocating motion. A method of determination of the operating time their lifetime, and the number of lifecycles is considered.