

УДК 625.7.08.002.5–222:532.5

## ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ШАРУ РІДИНИ В РУХОМОМУ З'ЄДНАННІ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ГІДРОДИНАМІКИ

Ремарчук М.П., д.т.н., професор

(Українська державна академія залізничного транспорту)

*Встановлено залежність для визначення товщини шару рідини між поверхнями рухомого з'єднання на основі застосування принципу гідродинамічного центрування. Товщина шару рідини визначається з урахуванням рівня навантаження у з'єднанні, що діє, наприклад, в силовому гідроциліндрі машин різних за призначенням.*

**Постановка проблеми.** Як відомо [1, 2], рідинне змащення забезпечується при виконанні конусоподібної зовнішньої поверхні поршня або внутрішньої – напрямної втулки. Рідинне гідродинамічне змащення можливе при умові рівності тиску рідини на вході і виході конфузорно-дифузорного кільцевого каналу та при переміщенні однієї із деталей рухомого з'єднання. Обов'язковою умовою для змащення поверхонь тертя в кільцевих каналах є наявність рідини, яка характеризується в'язкістю, позначеною як  $\mu$ . За рахунок поступального руху, наприклад поршня, в кільцевому каналі відбувається стискання шарів рідини. Такий стан породжує підвищення тиску рідини по довжині каналів, причому в конфузорному у більшій мірі, а дифузорному у меншій мірі. Таким чином,

завдяки руху поршня і наявності рідини в кільцевому каналі виникає процес зростання в цьому каналі тиску рідини, що сприяє виникненню сили назовемо її центрувальною, а процес – центруванням. Причому, центрувальна сила здатна розділяти наріжну поверхню поршня відносно внутрішньої поверхні циліндра шаром рідини і завдяки цьому змінює їх відносне положення до стану близького до віссиметричного. При зміні напрямку руху поршня гідроциліндра дифузорний канал стає конфузорним, а конфузорний – дифузорним, що дозволяє забезпечувати центрування поршня незалежно від напрямку його руху. Для забезпечення ефективної роботи з'єднання поршень – циліндр необхідно визначити мінімальну висоту по периметру кільцевого каналу, завдяки такому стану виникає центрувальне зусилля, що здатне сприйняти величину дії сили, яка направлена на зближення поверхонь тертя. Слід зазначити, що при зближенні поверхні поршня до поверхні циліндра, тобто в такому рухомому з'єднанні виникає центрувальне зусилля, яке діє на зустріч зусиллю, що направлене на зближення поверхонь поршня і циліндра. При умові досягнення рівності між центрувальним зусиллям і зусиллям, що діє на зближення поверхонь між ними виникає за величиною така товщина шару рідини, яка здатна розділити поверхні тертя. При цьому виникає сила рідинного тертя, яка суттєво відрізняється від сили сухого тертя. Визначення товщини шару рідини між поверхнями рухомого з'єднання при застосуванні гідродинамічного центрування є актуальною проблемою.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є забезпечення рідинного тертя в рухомому з'єднанні поршень – циліндр на основі застосування принципу гідродинамічного центрування. Для досягнення поставленої мети необхідно: – виконати пошук наукових джерел, в яких на основі рідинного тертя визначена величина центрувального зусилля і силу рідинного тертя між поршнем і циліндром; – визначити товщину шару рідини між поверхнями рухомого з'єднання поршень – циліндр та визначити рівень зниження сили тертя для цього з'єднання на основі використання теорії гідродинамічного змащення.

**Результати досліджень.** Дослідження процесу гідродинамічного змащення в з'єднаннях зі зворотно-поступальним рухом базуються на рішенні рівнянь Нав'є-Стокса, результати яких наведено в роботах [3, 4 і 5]. Зокрема, схемне рішення поршневого вузла, в якому його конусоподібна наріжна поверхня спільно з внутрішньою поверхнею циліндра створює конфузорно-дифузорний кільцевий канал, наведено на рис. 1, а реалізація принципу рідинного змащення за рахунок гідродинамічного центрування для поршневого [5] і штокового [6] вузлів гідроциліндра показано на рис. 2.

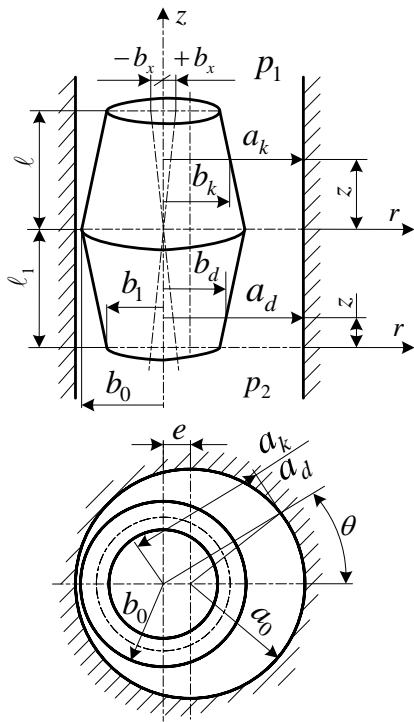


Рис. 1. Схема поршня гідроциліндра з гідродинамічним центруванням [4 і 5].

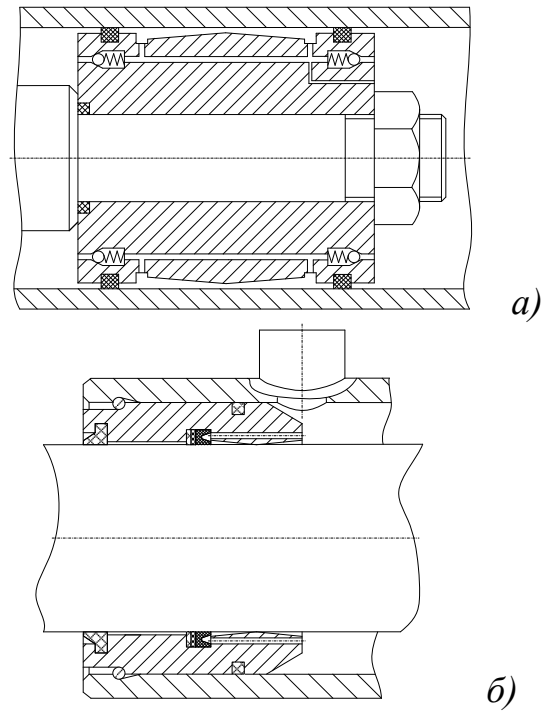


Рис. 2. Конструктивні рішення; а) – поршневого [5]; б) – штокового вузлів гідроциліндра [6]

Розглянемо основні результати цих досліджень. Так, параметр, що описує зовнішню поверхню поршня відносно координати  $z$  для конфузорного  $b_k$ , дифузорного  $b_d$  кільцевих каналів, визначається за формулами:

$$- \text{ для конфузорного каналу } b_k = b_0 \pm \frac{b_x z}{\ell} \cos(\theta) - \frac{(b_0 - b_1) z}{\ell}, \quad (1)$$

$$- \text{ для дифузорного каналу } b_d = b_0 \mp \frac{b_x (\ell_1 - z)}{\ell_1} \cos(\theta) - \frac{(b_0 - b_1) z}{\ell_1}, \quad (2)$$

де  $b_0$ ,  $b_1$  – максимальний і мінімальний радіуси поршня;  $b_x$  – величина перекосу поршня відносно циліндра;  $z$  – координата, що визначає по довжині каналу зовнішню поверхню поршня;  $\ell$ ,  $\ell_1$  – довжина конфузорного і дифузорного кільцевого каналу.

Змінне значення висоти по периметру кільцевого каналу створеному в рухомому з'єднанні  $h_{k(d)}$  (товщина шару рідини по куту  $\theta$ ) в загальному вигляді (див. рис. 1) встановлюється як

$$h_{k(d)} = a_{k(d)} - b_{k(d)}. \quad (3)$$

Зокрема, для конфузорного кільцевого каналу значення його висоти визначається за формулами:

$$- \text{ поточне } h_k = h_0 \left( 1 + \left( \psi \mp \varepsilon_x \cos(\theta) \right) \frac{z}{\ell} + \varepsilon \cos(\theta) \right), \quad (4)$$

$$- \text{мінімальне} \quad h_{k.\min} = h_0 (1 + \varepsilon \cos(\theta)), \quad (5)$$

$$- \text{максимальне} \quad h_{k.\max} = h_0 (1 + \psi \mp \varepsilon_x \cos(\theta) + \varepsilon \cos(\theta)). \quad (6)$$

де  $h_0 = a_0 - b_0$  – віссиметрична висота радіального кільцевого каналу в зоні мінімальної відстані між поверхнями конфузорно-дифузорного з'єднання;

$\varepsilon = \frac{e}{a_0 - b_0}$  – відносний ексцентриситет;  $\psi = \frac{b_0 - b_1}{a_0 - b_0}$  – параметр конусної форми

виконання поршня;  $\varepsilon_x = \frac{b_x}{a_0 - b_0}$  – відносний перекик поршня в циліндрі.

При виконанні поршня з однаковими конусами, тобто однакових розмірів для обох частин поршня при створенні конфузорного і дифузорного кільцевих каналів тоді параметр  $\psi$  для них має однакове значення.

Для дифузорного кільцевого каналу значення його висоти визначається за такими формулами:

$$- \text{поточне} \quad h_d = h_0 (1 + (\psi \mp \varepsilon_x \cos(\theta)) \frac{\ell - z}{\ell} + \varepsilon \cos(\theta)), \quad (7)$$

$$- \text{мінімальне} \quad h_{d.\min} = h_{k.\min} = h_0 (1 + \varepsilon \cos(\theta)), \quad (8)$$

$$- \text{максимальне} \quad h_{d.\max} = h_{k.\max} = h_0 (1 + \psi \mp \varepsilon_x \cos(\theta) + \varepsilon \cos(\theta)). \quad (9)$$

Закономірності розподілу тиску по довжині конфузорного і дифузорного кільцевих каналів характеризуються залежностями, які мають вигляд:

$$p_k = p_0 + \frac{6 \cdot \vartheta_0 \cdot \mu \cdot \ell}{h_0^2 \cdot \psi_k} \cdot \left( \frac{1}{h_k} - \frac{1}{h_{k.\max}} \right) - \frac{A}{2} \cdot h_k^* \cdot \left( \frac{1}{h_k^2} - \frac{1}{h_{k.\max}^2} \right), \quad (10)$$

$$p_d = p_0 - \frac{3 \cdot \vartheta_0 \cdot \mu \cdot \ell}{h_0^2 \cdot \psi_k} \cdot \left( \frac{h_{d.\min}}{h_d^2} - \frac{h_{d.\min}}{h_{d.\max}^2} \right) - \frac{A}{2} \cdot h_k^* \cdot \left( \frac{1}{h_d^2} - \frac{1}{h_{d.\max}^2} \right), \quad (11)$$

де  $h_k^*$  – показник, який характеризує товщину шару рідини де тиск досягає найбільшого значення, розмірність м (мм).

Показник  $h_k^*$  визначається за формулою

$$h_k^* = \frac{h_{k.\min} \cdot h_{k.\max}}{h_{k.\max} + h_{k.\min}} + \frac{h_{k.\min}}{2}. \quad (12)$$

Використовуючи формули (10), (11) і (12) можна визначити величину загального центрального зусилля  $R_z$  при умові, що  $\ell = \ell_1$  згідно залежності

$$R_z = -2 b_0 \frac{6 \cdot \vartheta_0 \cdot \mu \cdot \ell}{h_0^2 \cdot \psi_k} \int_0^\pi \int_0^\ell (p_{dk} + p_{dd}) \cos(\theta) dz d\theta. \quad (13)$$

Центрувальне зусилля  $R_z(\varepsilon, \psi)$  згідно формули (13) визначається при умові ексцентричного  $\varepsilon$  зміщення поршня до поверхні циліндра з параметром конусного виконання поршня  $\psi$ . На зустріч центральному зусиллю діє децентрувальне зусилля, яке позначимо як  $R_d$ . Зусилля  $R_d$  призводить до зближення поверхонь поршня і циліндра. Зусилля  $R_d$  визначається згідно досліджень [7].

Для досягнення рівності між центрувальним зусиллям  $R_z(\varepsilon, \psi)$  і зусиллям  $R_d$ , складемо рівняння у вигляді

$$R_z(\varepsilon, \psi) = R_d. \quad (14)$$

На підставі рішення рівняння (14) отримаємо розрахункову величину ексцентричного зміщення поршня до поверхні циліндра у вигляді значення  $\varepsilon_r$ . На підставі  $\varepsilon_r$  визначимо товщину шару рідини між поверхнями рухомого з'єднання поршень – циліндр за формулою

$$h_{k.min} = h_{d.min} = h_0(1 - \varepsilon_r). \quad (15)$$

Сила, що витрачається на рідинне тертя  $F_{mp}$ , визначається за формулою

$$F_{mp} = \frac{-2 b_0 \mu \vartheta_0}{h_0} \left( \int_0^{\pi} \int_0^{\ell} \left( \frac{-3(h_k - h_k^*)}{h_k^2} - \frac{1}{h_k} \right) dz d\theta + \int_0^{\pi} \int_0^{\ell_1} \left( \frac{3(h_{d.min} - h_k^*)}{h_d^2} - \frac{1}{h_d} \right) dz d\theta \right). \quad (16)$$

Для визначення сили тертя  $F_{mp}$  за залежністю (16) необхідно в формулах (4), (6), (7) і (12) замінити параметр  $\varepsilon$  на  $\varepsilon_r$ .

Ефективність застосування гідродинамічного центрування  $E$  у відсотках при порівнянні сил рідинного  $F_{mp}$  і сухого  $F_{mp.s}$  тертя визначимо за формулою

$$E = \left( 1 - \frac{F_{mp}}{F_{mp.s}} \right) \cdot 100\%. \quad (17)$$

Одним із сучасних напрямків підвищення ефективності гідродинамічного центрування являється застосування методу обробки робочої рідини [8]. Застосування цього методу призводить до підвищення в'язкості рідини і відповідно до збільшення шару рідини, що розділяє тертьові поверхні.

**Висновки.** На підставі виконаної роботи можна визначити за залежністю (15) товщину шару рідини, завдяки якому забезпечується рідинне тертя і визначається у відсотках величина зниження сили тертя в рухомому з'єднанні поршень – циліндр.

### Список літератури:

1. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика / Б.Т. Емцев – М.: Машиностроение, – 1978. – 463 с.
2. Этисон И. Гидродинамика опоры поршневого типа. В кн. Проблемы трения и смазки / И. Этисон, О. Пинкус В // Труды американского общества инженеров-механиков. – М.: Мир, 1976, серия F, т. 98, № 3, С. 92–100.
3. Ремарчук Н.П. Гидродинамическое центрирование подвижных деталей в гидроцилиндрах / Н.П. Ремарчук, Ю.Д. Музыкин, В.В. Ничке // Горные, строительные и дорожные машины. Респ. науч.–техн. сб. – Киев: Техніка, – 1980. – Вып. 33. – С. 89–94.

4. Ремарчук М.П. Зменшення тертя в елементах гідросистем мобільних машин на основі теорії рідинного змащення / М.П. Ремарчук // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Харьков: Технологический центр. 2005.— №3/2(15). – С. 28–32.

5. Ремарчук М.П. Застосування гідродинамічного і гідростатичного змащення у рухомих з'єднаннях гідроциліндрів мобільних машин / М.П. Ремарчук, В.В. Ничке // Вестник ХНАДУ Сб. научн. Тр., Вып. 28. – Харьков: ХНАДУ. –2005. С. 32–35.

6. Пат. 49331 Україна, МКВ E02F9/22, F15B/22 Гідравлічний привід робочого органу екскаватора / В.О. Держинський, В.Д. Хорунжий, О.З.Токарев, М.П. Ремарчук, (Україна); – № 2001117632; заявл. 08.11.2001; опубл. 16.09.2002, Бюл. № 9. – 3 с.

7. Ремарчук М.П. Визначення гідромеханічного ККД силових гідроциліндрів мобільних машин / М.П. Ремарчук, В.О. Держинський // Наук. вісн. буд., Вип. 31. – Харків: ХДТУБА. – 2005. С. 190–197.

8. Лисіков Є.М. Нанотехнології на залізничному транспорті / Є.М. Лисіков, С.В. Воронін, О.О. Скорик, Д.В. Онопрейчук // Харків: ДІСА ПЛЮС. – 2013. – 212 с.

## **Аннотация**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ ЖИДКОСТИ В ПОДВИЖНОМ СОЕДИНЕНИИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГИДРОДИНАМИКИ**

Ремарчук Н.П.

*Установлена зависимость для определения толщины слоя жидкости между поверхностями подвижного соединения, созданного на основе использования принципа гидродинамического центрирования. Толщина слоя жидкости определяется с учетом уровня нагружения в соединении, которое действует, например, в силовом гидроцилиндре машин различных по назначению.*

## **Abstract**

### **DETERMINATION OF THE THICKNESS OF THE LIQUID LAYER IN A MOBILE CONNECTION TO THE THEORY OF HYDRODYNAMICS**

Remarchuk M.P.

*The dependence for determining the thickness of the fluid layer between the surfaces of the movable connection created through the use of the principle of hydrodynamic centering. The thickness of the liquid layer is determined considering the level of loading of the compound that acts, for example, a power cylinder machines different purpose.*