

УДК 623.004.67

В.Б. Кононов¹, С.С. Котляр², Д.А. Філістєєв²¹ Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків² Озброєння Збройних Сил України, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ ТЕРТЯ У ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПОРШНЕВИХ СИСТЕМАХ ВІЙСЬКОВОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

В статті досліджено вимірювання тиску та визначення надлишкового тиску, описані дослідження для визначення сили тертя між поршнем і циліндром, що обертається в мастилі, визначені параметри і характеристики, що характеризують вимірювальні поршневі системи, запропоновані установки для визначення сила тертя та залежності зміни частоти обертання від часу, які доцільно використовувати виїзними метрологічними групами в складі пересувних лабораторій вимірювальної техніки

Ключові слова: надлишковий тиск, поршневі системи.

Вступ

Постановка задачі. Питання повірки засобів вимірювальної техніки військового призначення військ (сил), що здійснюють вимірювання тиску, виїзними метрологічними групами в складі пересувних лабораторій вимірювальної техніки (ПЛВТ) баз вимірювальної техніки Озброєння Збройних Сил України є важливим завданням, що забезпечує єдності вимірювань параметрів засобів озброєння та військової техніки (ОВТ) та виконання завдань за призначенням.

Актуальність даної науково-прикладної задачі обумовлюється постійним підвищенням вимог до точного вимірювання тиску засобів ОВТ військ (сил), що забезпечує виконання завдань за призначенням.

Аналіз літератури теоретичні відомості про тиск у вимірювальних поршневих системах розглядаються в [1 – 4]. В [5] розглядаються питання організації та порядку експлуатації вимірювальної техніки у ЗС України. В [6] встановлюються правила експлуатації вимірювальної техніки військового призначення. Нажаль питання тертя у вимірювальних поршневих системах при здійс-

ненні повірки засобів вимірювальної техніки військового призначення військ (сил) остається відкритим.

Метою статті є дослідження сил тертя у вимірювальних поршневих системах при здійсненні повірки засобів ОВТ військ (сил).

Основний матеріал

Одним із завдань виїзних метрологічних груп у складі ПЛВТ баз вимірювальної техніки Озброєння Збройних Сил України є вимірювання тиску та визначення надлишкового тиску. При відтворенні і вимірі надлишкового тиску в діапазоні від 4 кПа до 1500 МПа в даний час найвищою точністю володіють вантажопоршневі манометри за допомогою яких здійснюється виконання завдань за призначенням засобів ОВТ. Основним вузлом, який визначає діапазон та похибку вимірювань є вимірювальна поршнева система (ВПС). Однак ВПС мають свої недоліки, одним з яких є існування сил тертя між поршнем і циліндром. Суттєве зменшення сил тертя досягається за рахунок використання неущільненого поршня, що обертається в циліндрі. Також для забезпечення малої сили тертя необхідна високоякісна обробка робочих (тертьових) поверхонь поршня

і циліндра, з використанням спеціальних матеріалів. Робоча рідина, яка проникає в зазор між поршнем і циліндром, при забезпеченні цілого ряду вимог щодо якості виготовлення ВПС і центрування зменшує сили тертя до значень, які визначаються порогом реагування ВПС. Також при обертанні поршня в циліндрі виникає віджимаюча сила, протидіюча силі тертя і центруючому поршневі [1].

Для визначення сили тертя між поршнем і циліндром, що обертається в мастилі, були проведені експериментальні дослідження.

Сила тертя при обертанні визначається за допомогою установки, схема якої наведена на рис. 1.

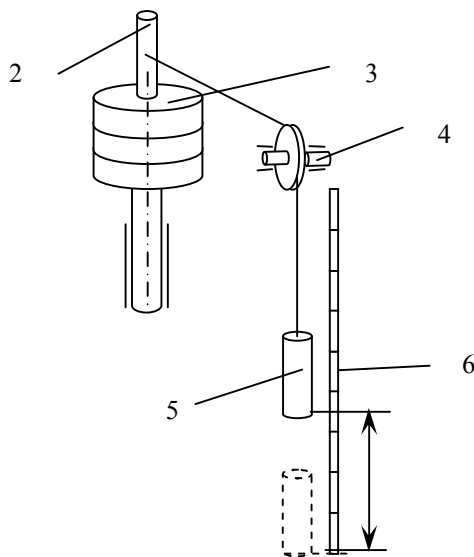


Рис. 1. Установка, за допомогою якої визначається сила тертя

До торцьової частини ВПС 1 співвісно з нею жорстко закріплений циліндр 2, на який намотується нитка 3. Один кінець нитки закріплений на циліндрі 2, до другого, перекинутого через що обертається з малим тертям блок 4, прикріплений вантаж масою 5 м. Вертикально розташована лінійка 6 дозволяє визначити положення вантажу. Нижній кінець лінійки відповідає нижньому положенню вантажа 5.

У початковому положенні нитка намотується на циліндр 2, і вантаж фіксується у верхньому положенні. Висота розташування вантажу h_0 визначається за допомогою лінійки 6. Потім вантаж відпускають, і він під дією власної ваги починає опускатися вниз. З моменту опускання починається відлік часу. Маса вантажу повинна бути достатньою, щоб подолати силу тертя спокою ВПС.

Спускаючись, вантаж приводить в обертання циліндр і, відповідно, ВПС. Після досягнення вантажем нижньої точки ВПС деякий час обертається за інерцією, внаслідок чого розмотався нитка намотується на нього знову.

Поршень, обертаючись по інерції, піднімає вантаж на висоту h_i , меншу, ніж h_0 , і далі повторюється до повної зупинки. Під час експерименту фіксується висота підйому до і після кожного циклу h_i та h_{i+1} відповідно, а також час підйому.

Потенційна енергія вантажу, що знаходиться на висоті h_i , дорівнює:

$$W_i = mgh_i. \quad (1)$$

Відповідно до закону збереження енергії, зменшення потенційної енергії після i -го циклу при підйомі на висоту $h_{i+1} < h_i$ дорівнює роботі з подолання сил тертя в ВПС і в блоці.

$$W_i - W_{i+1} = h_i + h_{i+1}. \quad (2)$$

або в розгорнутому вигляді (силою тертя в блоці можна знехтувати як незначну в порівнянні з тертям в ВПС) з (1) знаходимо силу тертя:

$$F_{\text{тр}} = mg \frac{h_i - h_{i+1}}{h_i + h_{i+1}}, \quad (3)$$

Також можна визначити момент інерції поршня з вантажами. За законом збереження енергії, потенційна енергія вантажу, що знаходиться у верхньому положенні, переходить у кінетичну енергію поступального руху вантажу, кінетичну енергію обертального руху поршня і на роботу з подолання сили тертя в ВПС:

$$mgh_i = \frac{mv^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2} + F_{\text{тр}} h_i. \quad (4)$$

Рух вантажу рівноприскореного без початкової швидкості. З (4) отримаємо момент інерції поршня:

$$J = mr^2 \left(gt^2 \frac{h_{i+1}}{h_{ii}(h_i + h_{i+1})} - 1 \right), \quad (5)$$

де r – радіус поршня.

Визначений по формулі (5) момент інерції навантаженого поршня дорівнює $0,14 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Сила тертя, усереднена за результатами трьох дослідів, дорівнює $1,01 \text{ Н}$. Сила тертя спокою $F_{\text{тр пок}}$, відповідна мінімальній вазі вантажу P_{min} масою m_{min} , при якому поршень приходить в обертання, дорівнює:

$$F_{\text{тр пок}} = P_{\text{min}} = m_{\text{min}} g = 3,43 \text{ Н}, \quad (6)$$

При обертанні поршня, ексцентрично розташованого в циліндрі, тиск в зазорі по його окружності розподіляється нерівномірно, в результаті чого виникає результуюча віджимаюча сила, протидіюча ексцентричному положенню поршня.

Гідродинамічна теорія змащення встановлює наступний зв'язок між віджимаючих силою і параметрами поршневої пари:

$$P = \frac{6\mu S U \alpha^2}{\delta^2 (1 + 2\alpha^2) \sqrt{\alpha^2 - 1}}, \quad (7)$$

де P - віджимаюча сила, U - лінійна швидкість на поверхні поршня, δ - ширина зазору між поршнем і циліндром, S - площа поверхні поршня, α - параметр, що характеризує ексцентричність поршня:

$$\alpha = \frac{\delta}{e}, \quad (8)$$

де e - ексцентриситет, μ - динамічна в'язкість.

Рівняння (7) можна виразити в такому вигляді:

$$P = 12\pi\mu \frac{r^3}{\delta^2} \omega z \frac{a}{(2 + a^2)\sqrt{1 - a^2}}, \quad (9)$$

де Z - протяжність зазору, $A = \frac{1}{\alpha}$ - відносний ексцентриситет поршня.

Визначена за формулою (9) віджимаються сила дорівнює 0,15 Н при частоті обертання поршня 0,7 об/с.

У процесі обертання поршень може нахилитися, внаслідок чого може статися зачеплення його зі стінками циліндра. Оцінимо силу, з якою поршень при цьому тисне на циліндр:

$$F = Mg \sin \beta, \quad (10)$$

де M - маса поршня з вантажами, g - прискорення вільного падіння, β - кут відхилення поршня від вертикалі.

Для різних β отримуємо наступні значення притискаючої сили, наведені в табл. 1:

Таблиця 1

Значення притискаючої сили для різних β

β	10"	20"	30"	40"	50"	1'
F, Н	0,0028	0,0056	0,0083	0,0111	0,0139	0,0167

Як видно з табл. 1, сила зчеплення між поршнем і циліндром при частоті 0,7 об/с на порядок менше віджимаючої сили. Однак по мірі зменшення частоти обертання віджимаюча сила зменшується. Так, при частоті 0,1 об/с її значення становить 0,02 Н, а при частоті 0,03 об/с - 0,007 Н.

Таким чином, при зниженні частоти обертання поршня в певний момент сила нерідкісного тертя перевищує віджимаючу силу, що і призводить до різкої зупинки поршня.

За законом Ньютона для руху тіл у в'язкій рідині дотична напруга τ , дорівнює відношенню сили тертя до площі,

$$\tau = \frac{F_{\text{тр}}}{S} = -\mu \cdot \text{grad } v, \quad (11)$$

В нашому випадку:

$$\frac{F_{\text{тр}}}{S} = -\mu \frac{dv}{dr} = -\frac{\mu df}{dr} R, \quad (12)$$

З (12) після інтегрування одержимо:

$$F_{\text{тр}} = -\frac{\mu f}{\delta} RS = -\frac{\mu f \pi R^3}{\delta}, \quad (13)$$

Проте слід враховувати, що залежність (13) має місце до того моменту, коли віджимаюча сила переважує над силою нерідкісного тертя.

Теоретична залежність кутової швидкості обертання поршня від часу має вигляд (14):

$$f = f_0 e^{-\frac{4\pi I_0 \mu r^3}{MR^2 \delta} t_{\text{тр}}}, \quad (14)$$

де $R_{\text{тр}}$ - радіус вантажів, f_0 - робоча довжина поршня.

Для визначення залежності зміни частоти обертання від часу була використана наступна установка, зображена на рис. 2.

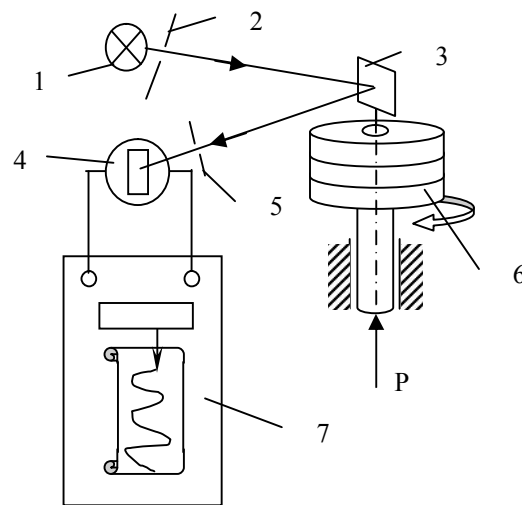


Рис. 2. Установка для визначення залежності зміни частоти обертання від часу

Установка працює наступним чином. На вісі вимірювальної поршневої системи 6, що знаходиться у вільному обертанні під постійним тиском $P = \text{const}$ закріплено одностороннє дзеркало 3. На дзеркало падає промінь світла від лампи 1, що проходить через діафрагму 2. При певному куті повороту ВПС від дзеркала 3 промінь потрапляє через діафрагму 5 на фотоприймач 4 підключений до реєструючого вольтметра 7 з стрічковим самописцем. При попаданні променя на фотоприймач 4 напруга на його виході збільшується, що реєструється самописцем у вигляді піку на діаграмі. Таким чином, відстань між двома піками буде відповідати часу одного обороту ВПС, з урахуванням швидкості переміщення стрічки самописця.

На рис. 3 наведені теоретична (пунктиром) і практична, отримана за усередненими результатами трьох дослідів, проведених на вищезазначеній установці, характеристики залежності зміни частоти від часу.

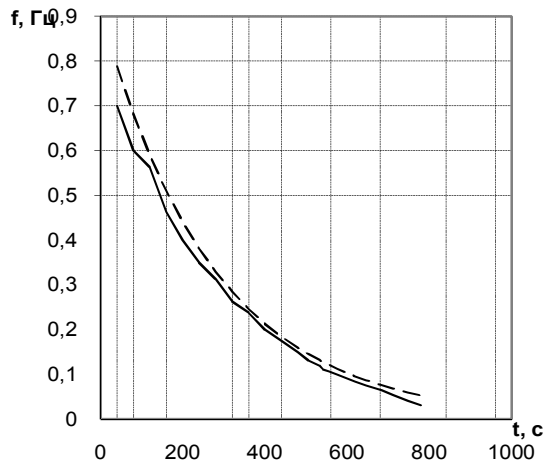


Рис. 3. Характеристики залежності зміни частоти від часу

Поріг реагування P_r ВПС по тиску не може бу-

ти менше значення $\frac{F_{тр}}{S}$:

$$P_r > \frac{F_{тр}}{S}, \quad (15)$$

За результатами експерименту з розрахунками на підставі (13) і (15) для еталонних ВПС значення P_r становлять від 0,33 Па до 2,35 Па при зміні частоти обертання від 0,1 Гц до 0,7 Гц.

ВИСНОВОК

1. Зменшення частоти від 0,1 Гц до 0,7 Гц веде до підвищення чутливості, але при цьому збільшуються сили нерідинного тертя, що значно впливає на точність відтворення одиниці тиску.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ В ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПОРШНЕВЫХ СИСТЕМАХ ВОЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.Б. Кононов, С.С. Котляр, Д.А. Филистеев

В статье исследовано измерение давления и определение избыточного давления, описаны исследования для определения сил трения между поршнем и цилиндром, который вращается в масле, определены параметры характеристики, которые характеризуют измерительные поршневые системы, предложены установки для определения силы трения и зависимости изменений частоты вращения от времени, которые целесообразно использовать выездными метрологическими группами в составе подвижных лабораторий измерительной техники.

Ключевые слова: излишнее давление, поршневые системы.

RESEARCH OF FORCES OF FRICTION IS IN MEASURINGS PISTON SYSTEMS OF MILITARY-ORIENTED

V.B. Kononov, S.S. Kotlyar, D.A. Filisteev

Measuring of pressure and determination of surplus pressure is investigational in the article, described research for determination of forces of friction between a piston and cylinder which is revolved in butter, parameters are certain descriptions which characterize the measurings piston systems are offered fluidizer determination of force of friction and dependence of changes of frequency rotations from time, which it is expedient to utilize departure metrology groups in composition the mobile laboratories of measuring technique.

Keywords: superfluous pressure, piston systems.

2. В результаті досліджень ВПС були визначені параметри і характеристики, що характеризують ВПС: експериментальна залежність зміни частоти обертання поршня від часу і проведено порівняння експериментальної залежності з теоретичною, залежність чутливості від частоти, а також оцінені сили тертя і віджимаються сила в поршневій парі.

3. При здійсненні повірки засобів ОВТ військ (сил) силами виїзних метрологічних групами в складі пересувних лабораторій виміральної техніки доцільно використовувати установку за допомогою якої визначається сила тертя та установку для визначення залежності зміни частоти обертання від часу.

Список літератури

1. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа* / Л.Г. Лойцянский. – М., Наука, 1987. – 840 с.
2. Фарсане Н.Г. *Технологические измерения и приборы* / Н.Г. Фарсане, Л.В. Ильясов. – М.: Высшая шк., 1989. – 340 с.
3. ДСТУ 4028-2001. *Манометри та калібратори надлишкового тиску поршневі. Загальні технічні вимоги.*
4. МПУ 004/04 – 99. *Рекомендації. Манометри и калібраторы избыточного давления поршневые. Методика поверки.*
5. Войтенко С.С. *Нормативні та організаційні основи метрологічного забезпечення військ (сил)* / С.С. Войтенко, С.В. Герасимов: навч.-метод. пос. – Х.: ХУПС, 2012. – 292 с.
6. *Наказ заступника Міністра оборони з озброєння – начальника озброєння ЗС України «Про затвердження Керівництва з організації та порядку експлуатації виміральної техніки у ЗС України» від 1.06.2001.*

Надійшла до редколегії 14.02.2014

Рецензент: д-р техн. наук проф. С.Т. Кондрашов, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.