

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ СТЕНДА ДЛЯ РЕСУРСНИХ ВИПРОБУВАНЬ РУКАВІВ ВИСОКОГО ТИСКУ

¹Вінницький національний технічний університет

На основі розробленої математичної моделі стенда для ресурсних випробувань рукавів високого тиску запропонована методика визначення його параметрів, які забезпечують заданий графік зміни випробувального тиску в рукаві.

Ключові слова: математична модель, рукав високого тиску, одиничний імпульс навантаження, клапан-пульсатор, мультиплікатор, газогідравлічний акумулятор, пневмогідроакумулятор.

Вступ

Рукави високого тиску (РВТ) знаходять широке застосування в гідрофікованих машинах завдяки зручності експлуатації та монтажу. Від надійності РВТ значною мірою залежать довговічність і безпека експлуатації машин.

Згідно з вимогами ГОСТ 6286-73 та ГОСТ 25452-82 (ці стандарти розповсюджуються на гумові РВТ з металевим обплетенням) зразки РВТ (визначені партії) підлягають статичним та динамічним випробуванням. Найвірогідніша оцінка якості РВТ забезпечується динамічними випробуваннями. Такі випробування здійснюються на спеціальних стендах, описаних, наприклад, в [1—3]. Задача такого стенда — забезпечення у внутрішній порожнині РВТ імпульсу тиску, форма і характеристика якого визначаються вищезгаданими стандартами.

Послідовність таких імпульсів протягом певного проміжку часу зумовлює руйнування стінки РВТ, або місць з'єднань шланга з фітінгами, або того і іншого. Цей проміжок часу може характеризувати ресурс роботи рукава і прогнозувати безаварійний режим роботи агрегату з використанням цього рукава.

Таким чином, постає задача забезпечення процесу встановлення випробувального тиску в РВТ, який повинен відповідати вимогам стандартів на випробування, за допомогою математичного моделювання.

Основна частина

1. Характеристики елементів стенда для випробування РВТ

Для складання математичної моделі стенда з його повної гідравлічної схеми виділено елементи, які безпосередньо формують тиск в порожнині випробуваного РВТ. В результаті отримано розрахункову схему, показану на рис. 1:

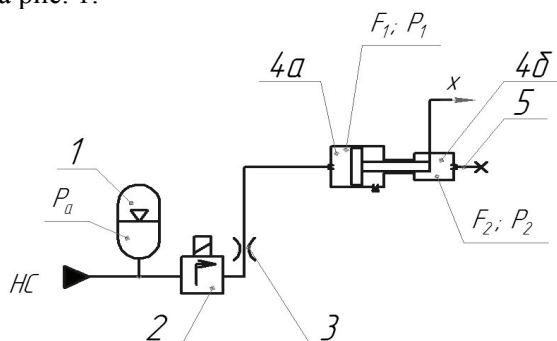


Рис. 1. Розрахункова схема стенда для ресурсних випробувань РВТ:

НС — насосна станція; 1 — газогідравлічний акумулятор; 2 — електромагнітний клапан; 3 — еквівалентний гідравлічний опір напірної магістралі разом з розподільною апаратурою; 4 — мультиплікатор тиску: а — порожнина низького тиску (вхід); б — порожнина високого тиску (вихід); 5 — випробуваний РВТ

1.1. Пружні характеристики РВТ

РВТ є складною гумово-тканинно-металічною системою. Характерною ознакою РВТ є змінний коефіцієнт пружності $K(P)$. Загальний вигляд залежності середнього значення коефіцієнта K від тиску P для діапазонів умовних проходів від 10 до 20 мм та довжин від 510 до 1800 мм показаний в [4].

Для здійснення розрахунків на ЕОМ необхідно інтерполювати графік $K(P)$ аналітичною залежністю. Видається зручним використати у цьому випадку експоненту, тобто вважати

$$K(P) = K_0 + A_0 e^{-\alpha P}, \quad (1)$$

де K_0, A_0, α — постійні коефіцієнти інтерполяції, які залежать від конструкції та типорозміру РВТ і визначаються із вищезгаданого графіка з урахуванням, що: $K(P) = 0,25 \cdot 10^{-4}$, якщо $P = 8$ МПа; $K(P) = 0,6 \cdot 10^{-4}$, якщо $P = 1$ МПа; $K(P) = \text{const}$, якщо $P \approx 8$ МПа.

З того ж графіка випливає, що $K = 0,25 \cdot 10^{-4}$. Приймаємо $\alpha P = 3$, якщо $P = 8$, і знаходимо

$$\alpha = 3/8 = 0,375.$$

Розв'язуючи рівняння

$$\begin{aligned} K_0 + A_0 e^{-3} &= 0,25 \cdot 10^{-4}; \\ K_0 + A_0 e^{-0,375 \cdot 1} &= 0,6 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad (2)$$

знаходимо інші коефіцієнти інтерполяції, відповідно:

$$\begin{aligned} A_0 \cdot (e^{-0,375} - e^{-3}) &= (0,6 - 0,25) \cdot 10^{-4}; \\ A_0 &= 0,35 \cdot 10^{-4} / 0,6374 \approx 0,55 \cdot 10^{-4}; \\ K_0 &= 0,25 \cdot 10^{-4} - 0,55 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-3} \approx 0,22 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Результатом виконаної інтерполяції є вираз

$$K(P) = \left[0,22 + 0,55 \cdot e^{-0,375P} \right] \cdot 10^{-4} \text{ см}^2/\text{Н}. \quad (3)$$

1.2. Оцінювання необхідного робочого об'єму мультиплікатора (порожнина плунжера)

Задано базовими розмірами РВТ: $d_y = 16$ мм — діаметр умовного проходу, $L = 1500$ мм — довжина.

Тоді об'єм порожнини РВТ складе

$$W = \pi d^2 / 4 L = \pi \cdot 1,6^2 \cdot 150 / 4 = 300 \text{ см}^3.$$

Виходячи з відомого рівняння [4]

$$\Delta W = K \cdot W \cdot \Delta P,$$

де ΔW — приріст об'єму порожнини зі зміною тиску в ній на ΔP , та задаючись тиском 12 МПа, визначимо межі потрібного об'єму:

$$\Delta P \cdot K_{\min} \cdot W < \Delta W < \Delta P \cdot K_{\max} \cdot W,$$

де $K_{\min} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{кг}$; $\Delta W = 120 \cdot 300 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = 9 \text{ см}^3$; $K_{\max} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{кг}$; $\Delta W = 120 \cdot 300 \times 0,6 \cdot 10^{-3} = 21,6 \text{ см}^3 \approx 22 \text{ см}^3$.

Таким чином, необхідний маневровий об'єм мультиплікатора в порожнині високого тиску знаходиться в межах $9 < \Delta W < 22 \text{ см}^3$. Точне значення величини ΔW можна визначити, якщо обчислити інтеграл

$$\Delta W = W \int_1^{P_{\max}} K(P) dP.$$

Однак, в цьому немає необхідності через розкид пружних характеристик РВТ різних типів та універсальність стенда.

1.3. Оцінка перехідної характеристики зміни тиску у випробуваному РВТ

Виходячи із зазначених в ГОСТ 6286-73 вимог до випробування та з урахуванням часу $\tau_{\text{ем}} = 0,025$ с ($\tau_{\text{ем}}$ — час спрацювання електромагнітного клапана), знайдемо максимально допу-

стимий час робочого ходу мультиплікатора:

$$\Delta\tau_M = 0,075 - 0,025 = 0,05 \text{ с.}$$

Тоді, максимальна подача (імпульсна подача) з порожнини високого тиску і швидкість потоку рідини на вході в РВТ складають, відповідно (S_{Π} — площа плунжера мультиплікатора):

$$Q_2 = \Delta W_{\max} / \Delta\tau_M = 22 / 0,05 = 440 \text{ см}^3/\text{с};$$

$$V_2 = Q_2 / S_{\Pi} = 440 \frac{4}{\pi \cdot 1,6^2} = 218,9 \text{ см/с} \approx 2,19 \text{ м/с.}$$

Визначимо діаметр плунжера мультиплікатора (виходячи з міркувань технологічності, приймемо довжину плунжера $L_{\Pi} = 10D_{\Pi}$)

$$D_{\Pi} = \sqrt[3]{\Delta W / 2,5\pi} = \sqrt[3]{22 / 2,5\pi} \approx 14 \text{ мм},$$

і, відповідно, робочий хід плунжера

$$L_{\Pi} = 10 D_{\Pi} = 10 \cdot 14 = 140 \text{ мм.}$$

Величина коефіцієнта мультиплікації α є суперечливою. З одного боку, чим більший цей коефіцієнт, тим в більш легких умовах (при фіксованому тиску випробування) працює головний насос станда, але, з іншого боку, збільшується потрібна подача, тобто, габарити та вартість насоса. Враховуючи, що випробувальний тиск РВТ цього типу не перевищує 12 МПа, вибираємо $\alpha = 5$. Тоді діаметр поршня D_0 мультиплікатора дорівнюватиме

$$D_0 = D_{\Pi} \sqrt{5} = 14 \sqrt{5} \approx 32 \text{ мм},$$

а його робоча площа

$$S_0 = \pi D_0^2 / 4 = 8 \text{ см}^2.$$

Тоді робочий об'єм порожнини мультиплікатора низького тиску складе

$$W_{\Pi} = S_0 \cdot L_{\Pi} = 8 \cdot 14 = 112 \text{ см}^3.$$

Середня подача головного насоса за максимальної (2 Гц) частоти навантаження складе

$$Q_{\Pi} = 112 \cdot 2 = 224 \text{ см}^3/\text{с} \approx 14 \text{ (л/хв)}.$$

Маневровий об'єм акумулятора становитиме

$$W_a = S_0 \cdot L_{\Pi} = 8 \cdot 14 = 112 \text{ (см}^3\text{)}.$$

Приймаючи, що маневровий об'єм акумулятора складає 1/3 його повного об'єму, визначимо об'єм його газової порожнини:

$$W_{\Gamma} = 112 \cdot 3 \approx 350 \text{ см}^3.$$

2. Моделювання станда для випробувань РВТ

Метою нижченаведеного аналізу є визначення процесу встановлення випробувального тиску в РВТ. Моделювання виконаємо у відповідності до методики [4], розробленої в науковій школі професора І. А. Немировського. Для цього: виділимо в гідросистемі замкнені об'єми рідини, всередині яких тиск по всьому об'єму рідини однаковий; рухомі елементи системи, активні та пасивні елементи, задамося їх гідравлічними характеристиками.

Математична модель згідно зі згаданою методикою включає в себе три групи рівнянь: рівняння балансу витрат рідини (для кожного об'єму); рівняння рівноваги рухомих деталей; рівняння витрат (для пасивних елементів) та рівняння гідравлічних характеристик (для активних елементів схеми).

Для розробки математичної моделі випробувального станда зроблено такі припущення: хвильові процеси в магістралях відсутні; час спрацьовування клапана 2 мізерно малий у порівнянні з тривалістю перехідного процесу і ним можна знехтувати; подача рідини насосом протягом перехідного процесу не впливає на тиск в акумуляторі; податливість робочої рідини у напірній магістралі можна знехтувати у порівнянні з податливістю акумулятора.

Відповідно до вищевикладеного запишемо:

– баланс витрат для магістралі нагнітання «акумулятор—клапан—напірний трубопровід—циліндр мультиплікатора»

$$Q_a = F_1 \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (4)$$

де Q_a — зміна робочого об'єму мультиплікатора; F_1 — робоча площа поршня мультиплікатора, $F_1 = S_0$; x — координата поршня мультиплікатора;

– баланс витрат камери високого тиску (вихідної порожнини) мультиплікатора

$$F_2 \cdot dx = K(P)W_n \cdot dP_2, \quad (5)$$

де F_2 — робоча площа плунжера мультиплікатора; $K(P)$ — характеристика податливості РВТ; W_n — об'єм робочої рідини у порожнині РВТ; P_2 — тиск у порожнині РВТ;

– рівняння рівноваги поршня (плунжера) мультиплікатора

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} = F_1 P_1 - F_2 P_2, \quad (6)$$

де P_1 — тиск у поршневій порожнині мультиплікатора; B — коефіцієнт в'язкого тертя поршня та плунжера мультиплікатора;

– рівняння течії рідини у напірній магістралі

$$P_a - P_1 = A_B Q_a^2 + B_B Q_a, \quad (7)$$

де A_0, B_0 — коефіцієнти, які характеризують місцеві та розподілені (ламінальні) втрати тиску у напірній магістралі;

– рівняння стану акумулятора

$$P_a V_x^{1,4} = \text{const}, \quad (8)$$

де P_a — тиск в момент, коли об'єм газової подушки складає V_x ; $V_x = W_x$; 1,4 — показник, який відповідає адиабатичному процесу в акумуляторі.

2.1. Визначення пружної характеристики РВТ

Пружна характеристика РВТ неявно задана кривою податливості (1), але разом з тим, до математичної моделі входить залежність $P_2(x)$ (див. (5)), яку і потрібно визначити у явному вигляді.

Очевидно, що зміна об'єму РВТ внаслідок його пружної деформації зумовлена підвищенням тиску у його порожнині і визначається залежністю

$$\Delta W = W_0 \cdot K(P) \cdot \Delta P. \quad (9)$$

Підставляючи у рівняння (8) вираз для податливості (1) та переходячи до нескінченно малих, отримуємо:

$$dW = W_0 (K_0 + A_0 e^{-\alpha P}) dP. \quad (10)$$

Інтегруючи малі деформації РВТ, отримуємо інтеграл:

$$\int_0^W dW = K_0 W_0 \int_0^P dP + A_0 W_0 \int_0^P e^{-\alpha P} dP. \quad (11)$$

Виконавши у вказаних межах інтегрування, отримуємо:

$$W(P) = K_0 W_0 P + A_0 W_0 (1 - e^{-\alpha P}). \quad (12)$$

При цьому, інтеграл взятий зі зворотним знаком, тому що в дійсності підвищення тиску пов'язано зі зменшенням об'єму РВТ.

З іншого боку, зміна об'єму порожнини РВТ зумовлена переміщенням плунжера мультиплікатора, тобто

$$W = F_2 \cdot x. \quad (13)$$

Звідки

$$F_2 x = K_0 W_0 P + A_0 W_0 (1 - e^{-\alpha P}). \quad (14)$$

Рівняння (14) є трансцендентним, визначити з нього залежність $P(x)$ можливо тільки наближеними методами. Зручнішим в цьому випадку буде подання пружних властивостей РВТ у вигляді залежного від тиску P модуля об'ємної пружності β , тобто

$$\beta(P) = 1 / K(P). \quad (15)$$

Лінеаризуючи цей вираз, отримаємо:

$$\beta'(P) = 1,16(1 - e^{-0,375P'}). \quad (16)$$

Рівняння (16) отримано з таких міркувань: оскільки пружна характеристика $\beta(P)$ не проходить через початок координат (див. графік у [4]), перейдемо до нової системи перетворенням $\beta' = \beta - 0,17$; $P' = P - 0,25$, перетин цих координат (0,25; 0,17) відповідає початку кривої $\beta(P)$, яку легко, використовуючи вираз (15), можна отримати, користуючись графіком $K(P)$ [4]. Остаточний вираз для розрахунку $\beta(P)$ має вигляд

$$\beta(P) = \left[0,17 + 1,16(1 - e^{-0,375(P-0,25)}) \right] \cdot 10^3 \text{ МПа}. \quad (17)$$

Рівняння рівноваги поршня — плунжера мультиплікатора для покращення стійкості розв'язку моделі можна перетворити до вигляду

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} = F_1 P_1 + F_2 P_{2_0} + F_2 dP_2. \quad (18)$$

де P_{2_0} — тиск у порожнині РВТ на початку i -ї розрахункової ділянки; dP_2 — приріст тиску у порожнині РВТ протягом проміжку часу Δt , що викликано переміщенням плунжера на величину dx .

Тоді

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + F_2 dP_2 = F_1 P_1 + F_2 P_{2_0}. \quad (19)$$

Частинна похідна тиску P_2 по переміщенню x характеризує пружну деформацію РВТ

$$\frac{\partial P_2}{\partial x} = \frac{F_2}{W_{III}} \left[0,17 + 1,16(1 - e^{-0,375(P-0,25)}) \right]. \quad (20)$$

З урахуванням рівняння (20), рівняння (19) матиме вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + \frac{F_2^2}{W_{III}} \left[0,17 + 1,16(1 - e^{-0,375(P-0,25)}) \right] \Delta x = F_1 P_1 + F_2 P_{2_0}, \quad (21)$$

де Δx — переміщення плунжера за i -й інтервал Δt .

Розглянувши координату x як суму попереднього переміщення x_0 і поточного Δx

$$x = x_0 + \Delta x,$$

та враховуючи, що

$$\frac{dx_0^2}{dt} \equiv 0; \quad \frac{dx_0}{dt} \equiv 0,$$

можна в рівнянні (21) знак приросту Δ опустити та розв'язати рівняння (21) відносно старшої похідної

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{1}{m} (F_1 P_1 - F_2 P_{2_0}) - \frac{B}{m} \frac{dx}{dt} - \frac{1}{m} C(P_2) x, \quad (22)$$

де

$$C(P_2) = \frac{F_2^2}{W_{III}} \left[0,17 + 1,16 \left(1 - e^{-0,375(P-0,25)} \right) \right]. \quad (23)$$

Рівняння течії рідини у напірній магістралі та стану акумулятора остаточно набудуть вигляду

$$P_1 = P_a - A_B F_1^2 \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 - B_B F_1 \frac{dx}{dt}, \quad (24)$$

де

$$P_a = P_0 \left(W_T / W_T + W_a \right)^{1,4} = P_0 0,76^{1,4} = 0,68 P_0 \quad (25)$$

(P_0 — початковий тиск в газовій порожнині акумулятора).

$$\frac{\partial P_2}{\partial x} = \frac{F_2}{W_{III}} \left[0,17 + 1,16 \left(1 - e^{-0,375(P-0,25)} \right) \right]. \quad (26)$$

Таким чином, для чисельного розрахунку перехідного процесу використані рівняння (22), (23), (24), (25) та (26).

Початкові умови:

$$x = 0, \text{ якщо } t = 0; \quad dx/dt = 0; \quad \partial P_2 / \partial x = 0; \quad P_1 = P_a.$$

При цьому, в рівняннях математичної моделі позначені та враховані величини таких параметрів: m — маса плунжера мультиплікатора, $m = 10$ кг; B — коефіцієнт в'язкого тертя поршня та плунжера мультиплікатора, $B = 0,1$ Н·с/см; F_1, F_2 — ефективна площа плунжера та поршня мультиплікатора, відповідно, $F_1 = 8$ см², $F_2 = 1,6$ см²; W_T — об'єм газової подушки мультиплікатора, $W_T = 350$ см³; A_B — коефіцієнт втрат у місцевих опорах напірної магістралі, $A_B = 0,5 \cdot 10^{-6}$ Н·с/см; B_B — коефіцієнт шляхових втрат у напірній магістралі, $B_B = 0,5 \cdot 10^{-3}$ Н·с/см; W_{III} — об'єм порожнин випробуваного РВТ; для РВТ з $d_y = 16$ мм, $L = 1500$ мм — $W_{III} = 300$ см³.

Використовуючи розроблену математичну модель, отримано криву навантаження РВТ випробувальним тиском (рис. 2).

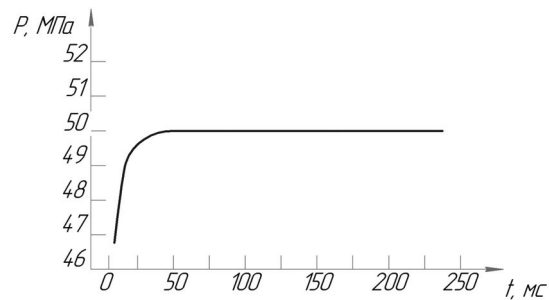


Рис. 2. Розрахована перехідна характеристика зміни тиску у випробуваному РВТ

Висновки

1. Для розрахунку за математичною моделлю кривої навантаження РВТ випробувальним тиском здійснена інтерполяція відомого графіка залежності коефіцієнта пружності РВТ від тиску [4].
2. Визначений необхідний робочий об'єм мультиплікатора.
3. Розроблена уточнена математична модель стенда для випробування РВТ.
4. Рівняння математичної моделі розв'язані на ЕОМ. В результаті отримано графік кривої навантаження РВТ випробувальним тиском. Отриманий імпульс тиску на виході мультиплікатора має форму, яка відповідає вимогам ГОСТ 6286-73 та ГОСТ 25452-82.
5. Оцінено часову характеристику стенда для випробування РВТ, на основі якої визначені основні конструктивні параметри стенда, які безпосередньо впливають на формування тиску випробування (витоки рідини, об'єми порожнин тощо).
6. Запропонована методика може бути використана для розробки стендів аналогічного призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Муляр Ю. І. Математична модель гідроприводу стенда для випробування на довговічність рукавів високого тиску та результати її дослідження / Ю. І. Муляр, О. В. Купчик // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2008. — № 3. — С. 73—78.
2. Ангина А. И. Установка для испытания рукавов высокого давления гидроприводов на надежность / А. И. Ангина, В. Е. Глушич, И. А. Немировский // Каучук и резина. — 1977. — № 8. — С. 49—51.

3. Муляр Ю. І. Гідросистема стенда для випробування рукавів високого тиску / Ю. І. Муляр, В. О. Глушич // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1999. — С. 61—63.

4. Гидроприводы сельскохозяйственных машин / Под ред. И.А. Немировского. — К. : Техніка, 1979. — 139 с.

Рекомендована кафедрою технології та автоматизації машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 3.06.2015

Муляр Юрій Іванович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології та автоматизації машинобудування, e-mail: yuri.mulyar@gmail.com.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Yu. I. Muliar¹

Choice of Parameters of Stand for Resource Tests of High-Pressure Hoses

¹Vinnitsia National Technical University

Based on the worked out mathematical model of stand for the resource tests of high-pressure hoses there has been offered the methodology of determination of its parameters that provide the set chart of change of proof-of-concept pressure in a hose.

Keywords: mathematical model, high pressure hose, single pulse load, valve pulsator, multiplier, gas-hydraulic accumulator of working fluid, hydropneumatic accumulator.

Muliar Yurii I. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Mechanical Engineering and Automation Technology, e-mail:yuri.mulyar@gmail.com

Ю. И. Муляр¹

Выбор параметров стенда для ресурсных испытаний рукавов высокого давления

¹Винницкий национальный технический университет

На основе разработанной математической модели стенда для ресурсных испытаний рукавов высокого давления предложена методика определения его параметров, которые обеспечивают заданный график изменения испытательного давления в рукаве.

Ключевые слова: математическая модель, рукав высокого давления (РВД), единичный импульс нагрузки, клапан-пульсатор, мультипликатор, газогидравлический аккумулятор рабочей жидкости, пневмогидроаккумулятор.

Муляр Юрий Иванович — канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и автоматизации машиностроения, e-mail: yuri.mulyar@gmail.com