

Ж.П. Дусанюк, канд. техн. наук,  
 О.В. Карватко  
 Вінницький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФОРМАЦІЇ РУКАВІВ ВИСОКОГО ТИСКУ В ОСЬОВОМУ НАПРЯМКУ

*Предложена математическая модель рукава высокого давления, позволяющая определить его деформации в осевом направлении. Выполнены имитационные исследования зависимости деформации от конструктивных параметров рукава высокого давления и давления в гидросистеме.*

*Mathematical model of a high-pressure hose is proposed, which makes it possible to determine its deformation in axial direction. Simulation study of how the deformation depends on the design parameters of high-pressure hose in hydraulic system has been performed.*

### Вступ

Гідроприводи сучасних технологічних машин в своєму складі в якості з'єднувальних магістралей містять рукава високого тиску (РВТ). Від них, як і від багатьох інших ланок машини, залежить надійність, довготривалість, зручність експлуатації останньої. Тому виникає необхідність у дослідженні і детальному вивченні РВТ, що дасть змогу покращити експлуатаційні та технологічні можливості самої машини.

При подачі рідини під тиском змінюється об'єм РВТ за рахунок деформації його діаметра і довжини. Імітаційними та експериментальними дослідженнями РВТ займався ряд авторів [1–6], ними запропоновані математичні моделі РВТ, які складено із суттєвими припущеннями. Автори [1, 2] розглядали деформації в радіальному напрямку, причому приймалося припущення, що металеве обплетення, яке є складовою частиною конструкції — це тонкостінна оболонка. Враховувалися жорсткість та в'язке тертя в шарах РВТ. В роботі [3] математична модель враховує лише жорсткість шарів, при цьому вважалося, що деформування проходить в радіальному напрямку. Автори роботи [4] запропонували математичну модель РВТ, яка дозволяє визначити подовження в осьовому напрямку гумового шару. В роботі прийнято припущення, що металеве обплетення — це тонкостінна оболонка. Математична модель РВТ [5] враховує, що металеве обплетення — це дріт, навитий під певним кутом на гумову оболонку. Аналізувалися переміщення в радіальному напрямку.

Тому дослідження переміщень РВТ в осьовому напрямку, які можуть впливати на роботу з'єднаних з ним рухомих елементів гідросистеми, важливі для підвищення надійності роботи гідросистеми.

### Постановка задачі

Для дослідження деформації РВТ в осьовому напрямку та впливу на її величину конструктивних параметрів необхідно вирішити наступні задачі:

1. Розробити математичну модель, яка дає можливість визначити осьові переміщення РВТ.
2. Провести дослідження впливу конструктивних параметрів РВТ, а саме: довжини, кількості металевих обплетень, кута навивання дроту металевого обплетення та його товщини на величину деформації в осьовому напрямку.

3. Встановити залежність деформації РВТ в осьовому напрямку від тиску в гідросистемі.

### Математична модель

РВТ з одним металевим обплетенням відповідає реологічна модель, показана на рис. 1. Металевий шар моделюється як пружина з певною жорсткістю  $C_{1m}$ . Із ним з'єднані гумові шари, які представлені як пружини з жорсткістю  $C_{1e}$  і  $C_{2e}$  та демпфери  $b_1$ ,  $b_2$ . Згідно представленої моделі імпульс тиску, що надходить до рукава, діє на внутрішню стінку, яка має діаметр внутрішнього, тобто першого шару гуми. З врахуванням передатного відношення першого гумового шару зусилля надходить до металевого обплетення, яке передає тиск на другий гумовий шар. Дана модель враховує переміщення РВТ в радіальному напрямку.

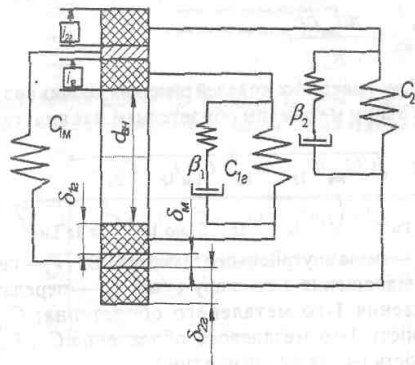


Рис. 1. Реологічна модель РВТ з одним металевим обплетенням.

Згідно цієї моделі визначення жорсткості  $n$ -го металевого обплетення РВТ в радіальному напрямку має вид [5]:

$$C_{nm} = \frac{E \cdot \pi \cdot \delta \cdot d_{вн}^2}{2 \cdot (d_{вн} + \sum_{i=1}^n \delta_{i2} + \sum_{i=1}^{n-1} \delta)^2} \quad (1)$$

де  $E$  — модуль пружності матеріалу дроту;  $d$  — діаметр дроту металевого обплетення;  $d_{вн}$  — внутрішній

діаметр рукава;  $d_{1z}, d_{2z}, \dots, d_{iz}$  — товщина 1-го, 2-го, ...  $i$ -го гумових шарів;  $n$  — кількість металевих обплетень.

Розрахункову модель, яка враховує переміщення в осьовому напрямку, [4] показано на рис. 2.

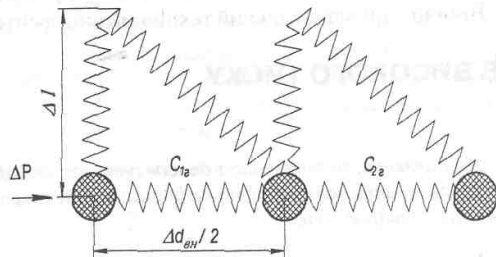


Рис. 2. Розрахункова модель осьового переміщення РВТ з одним металевим обплетенням.

Зміна довжини РВТ може бути визначеною за формулою [5]:

$$\Delta l = \frac{\sigma l}{E} = \frac{pR_{нов}}{\delta E} \cdot l, \quad (2)$$

де  $R_{нов}$  — радіус циліндричної поверхні, на яку навитий дріт;  $p$  — тиск, який діє на металеві обплетення;  $\sigma$  — напруження в металевих обплетеннях;  $l$  — довжина РВТ.

Згідно закону Гука:

$$P = C_{мо} \cdot \Delta l, \quad (3)$$

де  $P$  — сила, яка викликає переміщення  $\Delta l$ ;  $C_{мо}$  — жорсткість металевих обплетень в осьовому напрямку.

Сила може бути визначеною як

$$P = p \pi d_{вн} l. \quad (4)$$

З урахуванням формул (2)–(4) жорсткість металевих обплетень в осьовому напрямку дорівнює

$$C_{мо} = \frac{\pi d_{вн} \delta E}{R_{нов}}. \quad (5)$$

Згідно наведених моделей рівняння діючих сил для РВТ із одним металевим обплетенням має вид

$$p d_{вн} l \pi = \sqrt{\left( \Delta d_{вн} (C_{1z} \cdot \Delta d_{1z} + C_{1m} i_{1z} + C_{2z} \cdot \dots \right)^2 + \left( \Delta l (C_{1z} \cdot \Delta d_{1z} + C_{1m} i_{1z} + C_{2z} i_{1z} i_{1m}) \right)^2}, \quad (6)$$

де  $\Delta d_{вн}$  — зміна внутрішнього діаметра РВТ;  $i_{1z}$  — передатне відношення 1-го шару гуми;  $i_{1m}$  — передатне відношення 1-го металевих обплетень;  $C_{1m}$  — жорсткість 1-го металевих обплетень;  $C_{1z}$ ,  $C_{2z}$  — жорсткість 1-го та 2-го шарів гуми.

При складанні рівняння (6) прийнято припущення, що жорсткість гумових шарів в радіальному та осьовому напрямках однакова, тому що це суцільний матеріал. Жорсткість металевих обплетень в різних напрямках є різною. Металеві обплетення утворено із дроту, який навито під кутом і між витками є зазори. Під дією зусилля, яке розвивається в стінці РВТ при підвищенні в ньому тиску, виникає зміщення та розтягування саме ниток дроту, а не суцільного гумового шару. Тому жорсткість металевих обплетень визначається за формулою (1) для радіального напрямку, за формулою (5) для осьового напрямку.

$$\text{Згідно [6]} \quad \Delta d_{вн} = \Delta l \operatorname{tg} \alpha, \quad (7)$$

де  $\alpha$  — кут нахилання дроту.

З урахуванням залежностей (5)–(7) рівняння для визначення зміни довжини РВТ з одним металевим обплетенням має вигляд

$$\Delta l = \frac{p d_{вн} l \pi}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha (C_{1z} + C_{1m} i_{1z} + C_{2z} i_{1z} i_{1m})^2 + (C_{1z} + C_{1m} i_{1z} + C_{2z} i_{1z} i_{1m})^2}} \rightarrow \quad (8)$$

Тобто в загальному вигляді при  $n$ -ій кількості металевих обплетень

$$\Delta l = \pi p d_{вн} l \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha (C_{1z} + C_{1m} i_{1z} + \dots + \dots + C_{nm} i_{1z} \cdot i_{1z} i_{1m} \cdot \dots i_{(n-1)m} + C_{2z} i_{1z} i_{1m} + \dots + \dots + C_{2z} i_{1z} \cdot \dots i_{(i-1)z} i_{1m} \cdot \dots)^2 + (C_{1z} + C_{1m} i_{1z} + \dots + \dots + C_{nm} i_{1z} \cdot i_{1z} i_{1m} \cdot \dots i_{(n-1)m} + \dots + C_{2z} i_{1z} i_{1m} + \dots + C_{2z} i_{1z} \cdot \dots i_{(i-1)z} i_{1m} \cdot \dots)^2} \rightarrow \quad (9)$$

#### Результати дослідження

Проведено імітаційні дослідження деформації РВТ в осьовому напрямку для трьох типорозмірів  $d_{вн} = 10$  мм,  $d_{вн} = 20$  мм,  $d_{вн} = 32$  мм та довжини 385 мм, 810 мм, 1340 мм, 2400 мм, 3200 мм та 4000 мм.

На рис. 3а, б показано залежність деформації РВТ в осьовому напрямку від його довжини. Збільшення довжини РВТ призводить до збільшення переміщень в осьовому напрямку.

Це можна пояснити тим, що кількість витків дроту на більшій довжині РВТ відповідно теж більша. При цьому існує більша кількість зазорів, які вибираються при прикладанні зусилля і тому деформація є більшою. На рис. 3 показано залежності деформації для двох варіантів конструкції РВТ — з одним металевим обплетенням (а) та двома (б). Збільшення кількості металевих обплетень підвищує жорсткість конструкції РВТ, тому деформації в осьовому напрямку зменшуються.

На рис. 4 представлено залежність деформації РВТ в осьовому напрямку від кута нахилання дроту. Ця залежність є нелінійною. Чим більший кут нахилання дроту по відношенню до осі РВТ, тим меншими є переміщення. При куті  $90^\circ$  витки розміщуються перпендикулярно до осі РВТ, утворюючи практично беззазорну металеву оболонку, і тоді деформації стають близькими до 0. При малих кутах деформація виникає за рахунок видовження проволочки, а не за рахунок

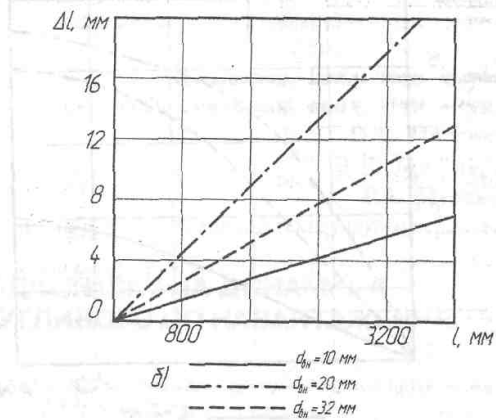
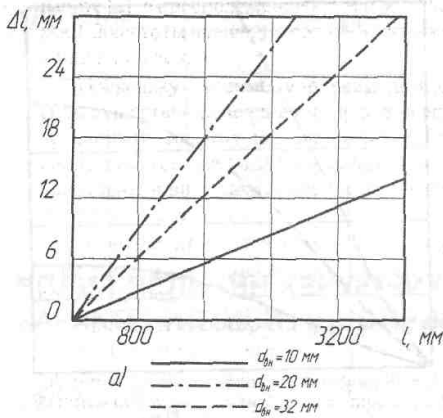


Рис. 3. Залежність осьової деформації РВТ від конструктивної довжини ( $p = 10$  МПа)  
а — РВТ з одним металевим обплетенням; б — РВТ з подвійним металевим обплетенням.

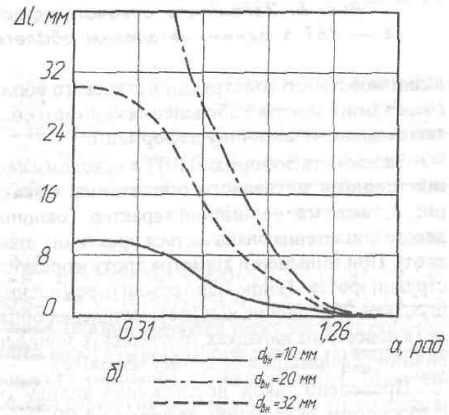
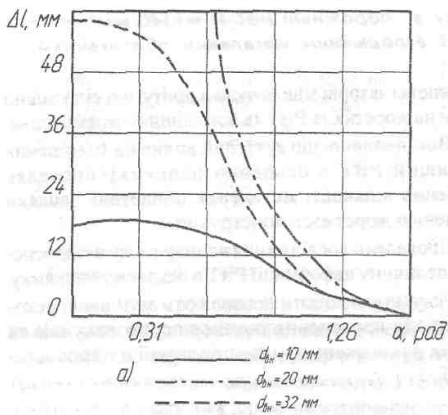


Рис. 4. Залежність осьової деформації РВТ від кута навівання дроту ( $p = 10$  МПа,  $l = 1340$  мм):  
а — РВТ з одним металевим обплетенням; б — РВТ з подвійним металевим обплетенням.

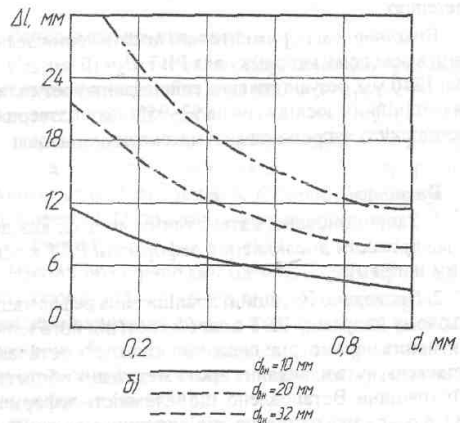
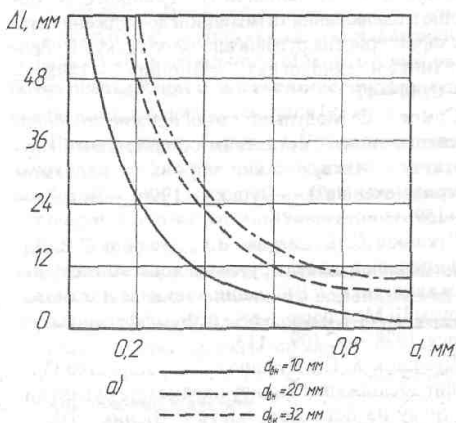


Рис. 5. Залежність осьової деформації РВТ від діаметра дроту металевого обплетення  
( $p = 10$  МПа,  $l = 1340$  мм):  
а — РВТ з одним металевим обплетенням; б — РВТ з подвійним металевим обплетенням.

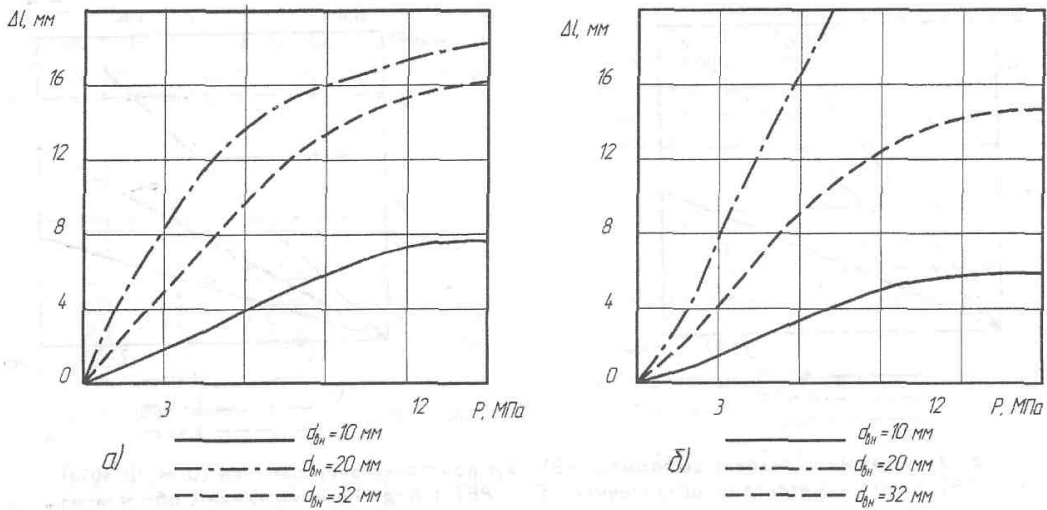


Рис. 6. Залежність осрової деформації від тиску в порожнині РВТ ( $l = 1340$  мм): а — РВТ з одним металевим обплетенням; б — РВТ з подвійним металевим обплетенням.

зміни жорсткості конструкції металевих обплетень (через зміну зазорів). Збільшення кількості обплетень також зменшує величину деформації.

Залежність деформації РВТ в осьовому напрямку від товщини металевих обплетень, показана на рис. 5, також має нелінійний характер. Товщина металевих обплетень визначається практично діаметром дроту. При збільшенні діаметра дроту жорсткість конструкції зростає і відповідно осьові переміщення зменшуються. Збільшення кількості металевих обплетень, як і в попередніх випадках, підтверджує зменшення величини деформації в осьовому напрямку.

Проведено також дослідження впливу тиску в гідросистемі на величину деформацій РВТ в осьовому напрямку, що зображено на рис. 6. Підвищення тиску призводить до збільшення зусилля, яке діє на стінки РВТ. Відповідно зростають деформації, які стабілізуються і мають постійне по величині значення після ліквідації зазорів між витками дроту в металевих обплетеннях.

Виконано експериментальні дослідження деформації в осьовому напрямку для РВТ  $d_{\text{вн}} = 10$  мм, довжиною 1340 мм, результати яких співпадають з результатами імітаційних досліджень на 93–95%, що підтверджує достовірність запропонованої математичної моделі.

#### Висновки

1. Запропоновано математичну модель, яка дозволяє провести дослідження деформації РВТ в осьовому напрямку.
2. Проведено імітаційні дослідження деформації в осьовому напрямку РВТ в залежності від його конструктивних параметрів: довжини, кількості металевих обплетень, кута навівання дроту металевих обплетень та їх товщини. Встановлено, що залежність деформації РВТ в осьовому напрямку від довжини має лінійний характер, а вплив кута навівання дроту металевих обплетень та їх товщини носить нелінійний характер. Це пояснюється складністю конструкції металевих обплетень

та наявністю зазорів між витками дроту, що відповідно впливає на жорсткість РВТ та його лінійні переміщення.

3. Встановлено, що суттєвий вплив на зменшення деформацій РВТ в осьовому напрямку проявляє збільшення кількості металевих обплетень завдяки підвищенню жорсткості конструкції.

4. Проведено дослідження впливу тиску в гідросистемі на величину деформації РВТ в осьовому напрямку.

5. Результати роботи дозволяють дати певні рекомендації для проведення інженерних розрахунків та наукових досліджень при використанні в гідросистемах РВТ.

#### Література

1. Дусанюк Ж.П., Дерібо О.В., Савуляк В.І., Дусанюк С.В. Дослідження динамічних характеристик рукавів високого тиску // Вісник ВПІ. — 1998. — № 1. — С. 83–87.
2. Савуляк В.І., Дусанюк Ж.П., Дусанюк С.В. Математичне моделювання та імітаційні дослідження статичних характеристик рукавів високого тиску // Вибрації в техніці та технологіях. — Вінниця. — 1998. — № 1. — С. 44–47.
3. Сомов Д.О. Модуль об'ємної пружності оболонок високого тиску з металевим обплетенням // Наукові нотатки // Міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка"). — Луцьк. — 1996. — Вип. 3. — С. 147–159.
4. Дусанюк Ж.П., Савуляк В.І., Дусанюк С.В. Динамічні процеси в стінках рукавів високого тиску під впливом хвилі тиску // Вибрації в техніці та технологіях. Труды III Междунар. науч.-техн. конференции. — Евпатория, 1998. — С. 109–113.
5. Дусанюк Ж.П., Дусанюк С.В., Карватко О.В. Імітаційні дослідження впливу параметрів рукава високого тиску на його жорсткість // Вісник ВПІ. — 2004. — № 4. — С. 80–84.
6. Лепетов В.А., Юрцев Л.Н. Расчеты и конструирование резиновых изделий. — Л.: Химия, 1977. — 327 с.