

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕМПФЕРІВ НА ОСНОВІ ПРОРІЗНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК

**О. О. Бедзір<sup>1</sup>, В. М. Шопа<sup>1</sup>, А. С. Величкович<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Інститут прикладних проблем механіки і математики  
ім. Я. С. Підстригача НАН України;  
79060, Львів, вул. Наукова, 3-б; e-mail: bedzir@mail.ru*

<sup>2</sup>*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
e-mail: budmech@nung.edu.ua*

*Представлені результати стендових досліджень натурних зразків прорізних оболонкових пружин бурових засобів віброзахисту. Досліджували натурні зразки пружних елементів бурових амортизаторів та лабораторні моделі з несучою ланкою у вигляді прорізної циліндричної оболонки. Зразки навантажували на універсальній випробувальній машині типу Р-50. За характером прикладення навантаження були статичними і квазістатичними. Контролювали напружений стан та радіальні переміщення прорізної оболонки, осьову податливість пружного елемента, розсіювання енергії в контактній системі. В результаті побудовано залежності контрольованих характеристик контактних тіл та демпферів, діаграми деформування при різних фізико-механічних та геометричних параметрах системи.*

**Ключові слова:** *демпфер, оболонкова пружина, прорізна циліндрична оболонка, експеримент, петля демпфування.*

**Постановка проблеми.** Висока несуча здатність, надійність і низька питома матеріалоемність оболонкових пружин зумовили їх широке використання в промисловості. На основі оболонкових пружних елементів розроблено комплекс пристроїв для віброзахисту та регулювання динамічного режиму бурильної колони. Ці пристрої ефективно і надійно працюють в екстремальних умовах бурової свердловини [1, 2]. Наявність значних статичних і динамічних навантажень, обмеженість діаметральних розмірів, агресивність робочого середовища, високі тиски і температура – ось лише невелика частина факторів, що визначають конструктивні особливості, ресурс роботи і ефективність бурових засобів віброзахисту. За конструкторським виконанням пристрої, що розглядаються, – це деформівні оболонкові системи із сухим тертям. Головні концепції механіко-математичного моделювання та розрахунку представників класу оболонкових пружних елементів з деформівним заповнювачем викладені в монографії [3]. Одним із типів віброзахисних пристроїв є прорізні оболонкові пружні елементи (рис. 1) [4].

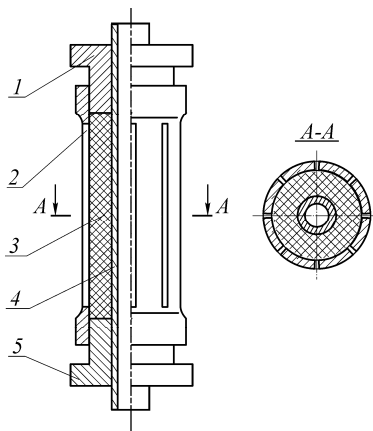


Рис. 1. Схема базової конструкції оболонкової пружини (1, 5 – поршні; 2 – несуча оболонка; 3 – деформівний заповнювач, 4 – ствол)

Вдале проектування і використання засобів віброзахисту залежить від якості теоретичних та експериментальних досліджень їх несучих ланок. В зв'язку з цим здійснюються наукові дослідження спрямовані на створення методик розрахунку, вивчення особливостей деформування, оптимізації оболонкових конструкцій. Зазвичай основою таких досліджень є створення розрахункових моделей роботи оболонкових пружин [3, 5-7]. Обґрунтування достовірності результатів, отриманих з допомогою таких моделей, не завжди може бути здійснене без відповідних експериментальних даних. Разом із цим у низці випадків стендові дослідження можуть бути використані при побудові розрахункових моделей, а результати аналізу експериментальних даних нарівні з розрахунковими можуть слугувати основою для вибору раціональних параметрів конструкції.

**Аналіз досліджень і публікацій з даної проблематики.** В роботі [8] представлено результати експериментальних досліджень натурних зразків пружних елементів бурових амортизаторів та їх лабораторні моделі з несучою ланкою у вигляді циліндричної оболонки. В повідомленні [9] представлені результати стендових досліджень натурних зразків прорізних оболонкових пружин бурових засобів віброзахисту. Альтернативою експериментальним дослідженням є застосування імітаційного моделювання взаємодії контактних тіл з використанням сучасних програмних продуктів [7].

**Метою роботи є:**

- одержання даних, які дозволять оцінити коректність та рівень точності отриманих раніше теоретичних результатів і висновків, а за необхідності скоригувати розроблені математичні моделі [5, 6];
- створення банку експериментальних даних для можливості тестування нових математичних моделей;

- одержання експлуатаційних характеристик оболонкових прорізних пружних елементів та їх аналіз;
- розробка методики проведення експериментальних досліджень оболонкових пружних елементів.

**Постановка завдання.** Методика проведення експериментального дослідження містила декілька етапів. На першому етапі здійснено підготовку натурних зразків та виготовлення масштабних лабораторних моделей оболонкових пружних елементів. Об'єктами досліджень були натурні зразки пружних елементів бурових амортизаторів та лабораторні моделі з несучою ланкою у вигляді прорізної циліндричної оболонки (рис.2). На цьому етапі проведено геометричний обмір конструкцій та їх складових елементів лінійно-вимірювальними приладами. Матеріал оболонок – сталь конструкційна легована 40ХНМА, заповнювач – сира гума підвищеної маслобензостійкості 7–3826С. Для проведення експериментальних досліджень підібрано пружні елементи з такими геометричними розмірами несучих ланок: внутрішній діаметр  $d = 0,142 \text{ м}$ , товщина стінки  $\delta = 5 \text{ мм}$ , довжини оболонок  $L : 0,2 \text{ м}; 0,3 \text{ м}; 0,4 \text{ м}; 0,5 \text{ м}; 0,6 \text{ м}$ .

Процес навантаження зразків здійснювався на універсальній випробувальній машині типу Р-50. За характером прикладення навантаження стендові дослідження були статичними і квазістатичними. Експериментальні зразки навантажували вздовж осі пружних елементів через масивні металеві пластини за принципом «навантаження – розвантаження» з фіксацією показів вимірювальних пристроїв на кожному етапі.

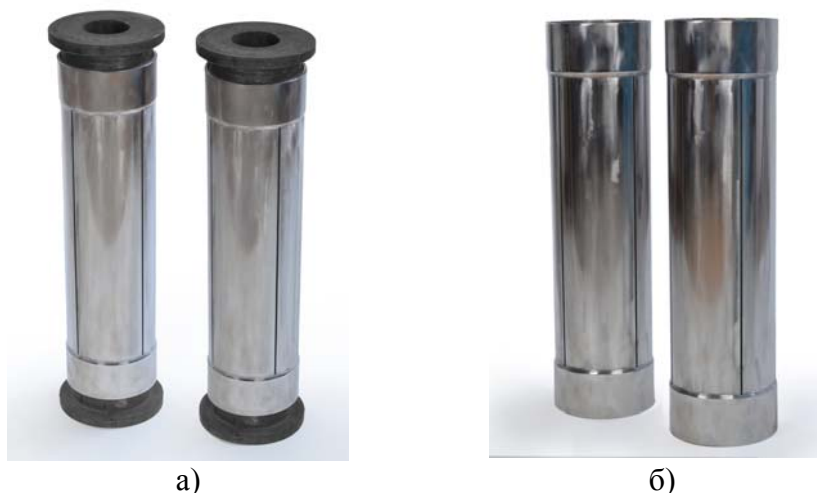


Рис. 2. Зразки об'єктів дослідження: а – лабораторний зразок оболонкової пружини; б – прорізна циліндрична оболонка

Запис деформацій несучих ланок оболонкових пружин виконано електротензотруванням (рис. 3). В експерименті використовували

дротяні тензодавачі на паперовій основі типу 2ПКБ з базою 10мм та номінальним опором 100 Ом. Наклеєні на оболонку тензорезистори підбирались з однієї партії так, щоб забезпечити мінімальне відхилення опору від номінального. За реєструючий пристрій було обрано цифровий тензометричний міст ЦТМ-5. Для визначення переміщень використовувався набір індикаторів годинникового типу ІЧ 10 МН.



Рис. 3. Зразки об'єктів дослідження з наклеєними тензодавачами

В процесі дослідження контролювали напружений стан та радіальні переміщення прорізної оболонки, осьову податливість пружного елемента, розсіювання енергії в контактній системі.

**Результати дослідження.** В результаті проведених експериментів побудовано залежності контрольованих характеристик контактних тіл та пристрою, діаграми деформування та визначено величину розсіяної за цикл енергії для різних фізико-механічних та геометричних параметрів системи. Розглянемо отримані результати.

На рис. 4 подано розподіл нормальних осьових напружень на зовнішній поверхні прорізної оболонки по її довжині (вздовж твірної) при навантаженні на пристрій  $100 \text{ кН}$  (нумерація кривих 1, 2, відповідає числу розрізів  $N = 4, 6$ , довжина оболонки  $L = 0,6 \text{ м}$ ). Штриховими лініями позначено випадок проковзування з коефіцієнтом тертя між оболонкою та заповнювачем  $f = 0,1$ , суцільними – при  $f = 0,5$ . Оскільки конструкція пружного елемента є симетричною, то і отримані дані є симетричними і представлені для півдовжини оболонки. Встановлено, що нормальні осьові напруження є максимальними за модулем на краях прорізної оболонки (у торцевих перерізах). При збільшенні кількості розрізів в оболонці та зменшенні тертя в контактній парі нормальні осьові напруження за модулем зростають.

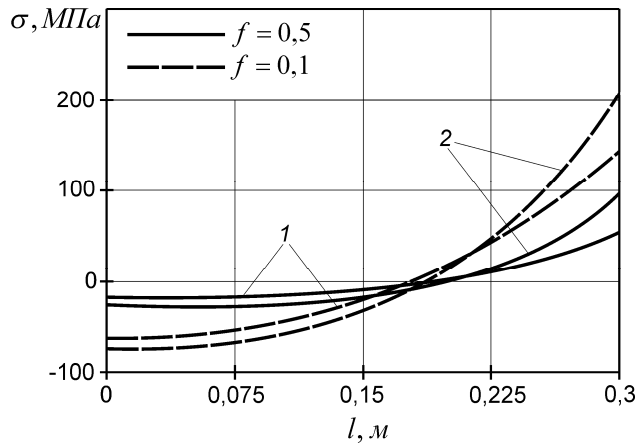


Рис. 4. Розподіл нормальних осьових напружень на зовнішній поверхні оболонки по її довжині

Для з'ясування залежності максимальних нормальних напружень від довжини оболонки проведено ряд експериментів. Було визначено величину напружень на зовнішній поверхні для оболонок з різною довжиною в області початку розрізів при навантаженні на пристрій 100 кН. На рис.5 представлено залежність максимальних нормальних осьових напружень в прорізній оболонці від її довжини. Позначення кривих аналогічні попередньому рисунку,  $l = L/2$  – півдовжина оболонки. Із діаграми видно, що нормальні напруження при зростанні довжини робочої частини оболонки зростають до певного значення  $\sigma_{\max}$ . Далі зі збільшенням довжини оболонки величина нормальних напружень залишається практично постійною, незалежно від збільшення довжини.

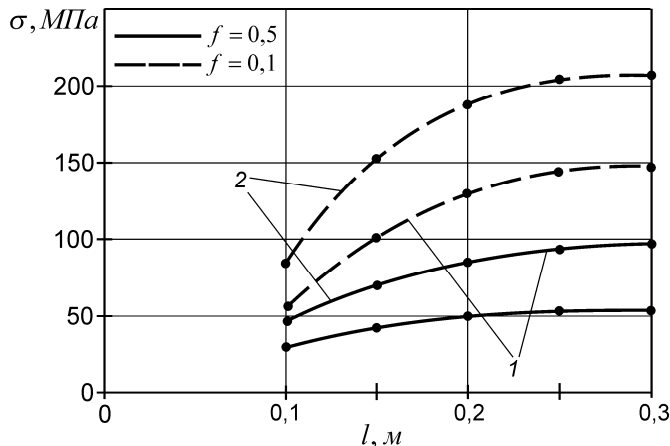


Рис. 5. Залежність максимальних нормальних осьових напружень в оболонці від її довжини

Важливою характеристикою оболонкових пружних елементів є їх жорсткість. Для визначення жорсткості амортизатора визначались

осьові переміщення поршнів від центрального стискаючого навантаження. На цьому етапі роботи досліджено залежність податливості оболонкової пружини від довжини робочої частини несучої ланки, кількості розрізів оболонки та коефіцієнта тертя між оболонкою та заповнювачем. Результати дослідження представлено на рис. 6. Збільшення кількості розрізів оболонки та її довжини, зменшення тертя між заповнювачем та оболонкою призводять до зростання осьового переміщення поршнів. У розглянутому діапазоні довжин оболонкової пружини залежність в основному має лінійний характер.

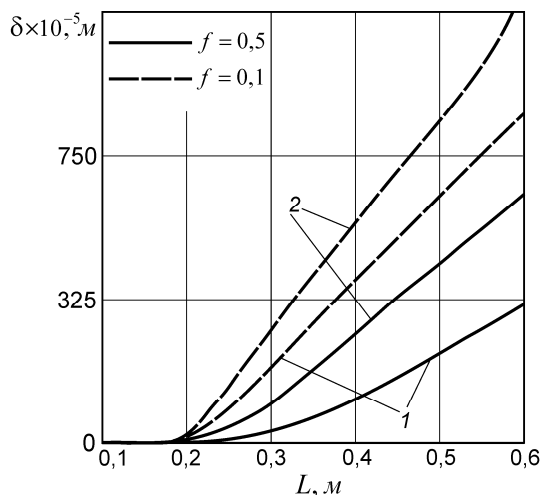


Рис. 6. Залежність осьового переміщення торців заповнювача від довжини оболонки

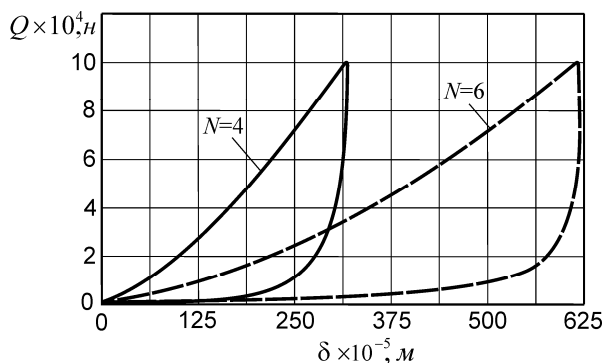


Рис. 7. Експериментальна петля демпфування пружного елемента

На завершальному етапі досліджень побудовано експериментальні петлі демпфування. На рис. 7 представлено діаграми, що описують процес навантаження оболонкової пружини з різною кількістю розрізів оболонки (довжина  $L = 0,6 \text{ м}$ , коефіцієнт тертя пари оболонка – заповнювач  $f = 0,5$ ). Площа кожної петлі демпфування чисельно рівна втраті підведеної до пружного елемента енергії за цикл навантаження. Ана-

ліз отриманих експериментальних даних показує, що при збільшенні кількості розрізів в оболонці зростає розсіювання енергії в пристрої за цикл «навантаження – розвантаження».

**Висновки.** Проведені експериментальні дослідження дали змогу з'ясувати вплив довжини робочої частини та товщини оболонок, кількості розрізів та трибологічних властивостей контактних тіл на жорсткість оболонкових пружних елементів. Збільшення кількості розрізів оболонки та її довжини, зменшення тертя між заповнювачем та оболонкою призводять до зменшення жорсткості пружного елемента. Було отримано картину розподілу нормальних осьових напружень по твірній прорізної циліндричної оболонки. Експериментально підтверджено виникнення максимальних нормальних осьових напружень в оболонці на початку розрізів. При збільшенні кількості розрізів в оболонці зростає розсіювання енергії в пристрої за цикл «навантаження – розвантаження»

Результати експериментальних досліджень узгоджуються з теоретичними, дозволяють оцінити працездатність конструкції і можуть слугувати основою для вибору раціональних параметрів прорізних оболонкових пружних елементів.

### *Література*

1. Величкович А. С. Комплекс засобів віброзахисту та регулювання динамічного режиму бурильної колони / А. С. Величкович, С. В. Величкович, В. М. Шопа. – Івано-Франківськ: Сіверсія ЛТД, 2000. – 86 с.
2. Оболонкові пружини / В. М. Шопа, А. С. Величкович, С. В. Величкович та ін. – Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 92 с.
3. Попадюк І. Й. Механіка фрикційного контакту оболонок з деформівним заповнювачем / І. Й. Попадюк, І. П. Шацький, В. М. Шопа. – Івано-Франківськ: Факел, 2003. – 180 с.
4. А.с. 637572 СССР, МКИ F 16 F 1/40. Упругий элемент / В.М. Шопа, С.В. Величкович. – Опубл. 15.12.78 г., Бюл. № 46.
5. Бедзир А. А. Неидеальный контакт в составной оболочечной конструкции с деформируемым наполнителем / А. А. Бедзир, И. П. Шацкий, В. М. Шопа // Прикл. механика. – 1995. – 31, №5. – С. 25-29.
6. Бедзир О.О. Контактна взаємодія прорізної циліндричної оболонки та деформівного заповнювача з урахуванням сухого тертя / О.О. Бедзир, В.М. Шопа // Мат. методи та фізико-механічні поля. – 2009. – 52, №1. – С. 132-137.
7. Величкович А.С. Експериментальна верифікація скінченно-елементної моделі контактної взаємодії розрізаної оболонки з пружним тілом / А.С. Величкович, Т.М. Даляк // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2012. – № 1(31). – С. 80-86.
8. Velichkovich A. S. Experimental study of shell flexible component for drilling vibration damping devices / A. S Velichkovich, I. I. Popadyuk,

- V. M. Shopa // Chemical and Petroleum Engineering. – New York: Springer – 2011. – Vol. 46, № 9 – 10. – Pp. 518-524.
9. Бедзір О. Експериментальні дослідження прорізних оболонкових пружних елементів / О. Бедзір, В. Шопя, А. Величкович // Сучасні проблеми механіки та математики: В 3-х т. / Під заг. ред. Р. М. Кушніра, Б. Й. Пташника. – Львів: Ін-т прикл. проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, 2013. – Т. 2. – С. 66.
- Стаття надійшла до редакційної колегії 17.10.2016 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Артимом В.І.,  
д.ф.-м.н., с.н.с. Шацьким І.П.*

## EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF DAMPERS ON BASIS OF SLOTTED CYLINDRICAL SHELLS

**O. O. Bedzir<sup>1</sup>, V. M. Shopa<sup>1</sup>, A. S. Velychkovych<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics,  
National Academy of Sciences of Ukraine;*

*79060, Lviv, Naukova str., 3-b; e-mail: bedzir@mail.ru*

<sup>2</sup>*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;*

*76019, Ivano-Frankivsk, Carpats'ka str., 15;*

*e-mail: budmech@nung.edu.ua*

*The results of experimental investigations of the real-life specimens of slotted shell springs of drilling tools for vibration protection are presented. The objects of research were the real-life specimens of elastic elements of drilling absorbers and laboratory models with the load bearing element in the form of slotted cylindrical shell. The process of loading the samples was implemented in the universal testing machine of the type P-50. The character of loading applied was static and quasi-static. In the process of the experiment the stress state and the radial displacements in the slotted shell, the axial compliance of elastic element, the energy dissipation in the contact system were monitored. As a result of experiments carried out the dependencies of the controlled characteristics of the contact bodies and the damper, the diagrams of deformation are built for the various physico-mechanical and geometric parameters of the system is determined.*

**Key words:** *damper, shell spring, slotted cylindrical shell, experiment, loop damping.*