

**ОЦІНКА ЗАСТОСУВАННЯ РУКАВІВ ВИСОКОГО ТИСКУ ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕНЬ МІЖ МЕТАЛЕВИМИ ОБПЛЕТЕННЯМИ**

Леонід Пелевін<sup>1</sup>, Григорій Мачишин<sup>1</sup>, Маріюнас Богдєвічус<sup>2</sup>, Микола Карпенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва і архітектури,  
03680, Повітрофлотський просп. 31, Київ, Україна, e-mail: Leonid\_pelevin@ukr.net, ma4tchin@ukr.net

<sup>2</sup>Вільнюський технічний університет ім. Гедімінаса,  
м. Вільнюс, Литева, Saulėtekio av., 11, Vilnius, LT – 10223, e-mail: marijonas.bogdevicus@vgtu.lt,  
mykola.karpenko@vgtu.lt

**ASSESSMENT OF APPLICATION HIGH PRESSURE HOSES USING MATHEMATICAL MODEL CALCULATION LOAD DISTRIBUTION BETWEEN THE METAL BRAID**

Leonid Pelevin<sup>1</sup>, Grygory Machyshyn<sup>1</sup>, Marijonas Bogdevičius<sup>2</sup>, Nikolai Karpenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture  
Povitroflotskyu prosp., 31, Kyiv, Ukraine, 03680, e-mail: Leonid\_pelevin@ukr.net, ma4tchin@ukr.net

<sup>2</sup>Vilnius Gediminas Technical University. Hedyminasa,  
Vilnius, Lithuania, Saulėtekio av., 11, Vilnius, LT – 10223, e-mail: marijonas.bogdevicus@vgtu.lt,  
mykola.karpenko@vgtu.lt

**АНОТАЦІЯ.** Розглянуто питання підбору та застосування рукавів високого тиску для гідравлічних систем шляхом розрахунку розподілу тиску (динамічних навантажень) на металеве обплетення рукава та визначено розривне зусилля на кожному обплетенні. Побудовано залежність тиску від діаметра рукава та кількості обплетень. Визначено розподіл динамічних навантажень на кожне обплетення та порівняно співвідношення розподілу гідравлічного тиску на кожне обплетення. Порівняно розривне динамічне зусилля звичайних рукавів високого тиску (SN) та компактних (SC).

**Ключові слова:** рукав високого тиску, динамічні навантаження, металеве обплетення, розривне зусилля, гідравлічний тиск.

**АННОТАЦИЯ.** Рассмотрены вопросы подбора и применения рукавов высокого давления для гидравлических систем путем расчета распределения давления (динамических нагрузок) на металлическую оплетку рукава определено разрывное усилие на каждой оплетке. Построена зависимость давления от диаметра рукава и количества оплеток. Определено распределение динамических нагрузок на каждую оплетку и выполнено сравнение распределения гидравлического давления на каждую оплетку. Сравнено разрывное динамическое усилие обычных рукавов высокого давления (SN) и компактных (SC).

**Ключевые слова:** рукав высокого давления, динамические нагрузки, металлические оплетки, разрывное усилие, гидравлическое давление.

**ABSTRACT. Purpose.** Research and development of a mathematical model that takes into account the dynamic load distribution between layers of a high pressure hose. **Methodology/approach.** Theoretical dependences allow to develop effective mathematical model of cutting. **Findings.** The mathematical model helps to evaluate and select High pressure for further use. **Research limitations/implications.** This study is the first step in the application of abrasive wheels in the repair of high pressure. **Originality/value.** Shares of hydraulic pressure decreases in the above ratio, from the first (internal) to the next. Increasing the number of metal braid leads to increased stiffness of the sleeve design and discontinuous pressure it increases slightly.

**Key words:** high-pressure hose, dynamic loading, metallic braid, breaking strength, hydraulic pressure.

**ВСТУП**

Рукави високого тиску (РВТ) використовуються як гнучкий трубопровід у гідро-системах машин і механізмів для транспортування мінеральних олій, гідравлічних рідин, рідкого палива в дорожньо-будівельній, гірничодобувній, сільськогосподарській та в інших галузях. Для довго-

вічної роботи рукавів для кожної конкретної гідравлічної системи підбирається свій тип рукава, який залежить від багатьох критеріїв. Одним з основних критеріїв підбору РВТ є опір тиску гідравлічної рідини в системі, тому підбір відбувається завжди із запасом міцності. На сьогодні відсутні чіткі теоретичні та математичні методики визначення розривних зусиль рукавів високого тиску.

## МЕТА РОБОТИ

Основним засобом забезпечення міцності рукава високого тиску є металеве обплетення та кількість його шарів, причому існує значна різниця в навантаженнях, що сприймаються першим внутрішнім обплетенням та останнім зовнішнім. Отже, актуальним питанням є розробка та дослідження математичної моделі, що враховує розподіл динамічного навантаження між шарами рукава, для подальшого оцінювання, застосування та підбору рукавів в гідравлічних системах із врахуванням запасу міцності.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Як правило, РВТ не армовані, але посилені одним або декількома шарами спірального чи перехресного металевих обплетення для досягнення необхідного запасу міцності на розрив. У більшості випадків рукав складається з трьох основних елементів: внутрішнього гумового шару (камери), підсилюючого шару (силового каркаса), зовнішнього гумового шару (захисного покриття). Камера забезпечує герметичність рукава, його опір хімічній і фізичній дії робочого середовища. Силовий каркас призначений для сприймання механічних напружень від внутрішнього або зовнішнього тиску, ваги, що транспортується. Зовнішній гумовий шар захищає рукав від впливу зовнішніх факторів (стирання та інших механічних пошкоджень, атмосферних факторів і т. д.) (рис. 1) [1, 2].

Розподіл навантажень в каркасі рукава, який має однорідне обплетення, можна розглядати в наступному вигляді:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_i, \quad (1)$$

де  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_i$  - частини гідравлічного тиску  $P$  системи, що сприймаються відповідними обплетеннями.

При сприйманні тиску в каркасі рукава відбувається деформація та переміщення в металевих обплетеннях (відбувається опір деформації від тиску на розрив) [3]. Рів-

няння сумісності деформацій і переміщень обплетень в рукаві, наприклад, з двома металевими переплетеннями 2SN та 2SC (рис. 2) при цьому буде мати вигляд

$$Pd_1^2 = P_{1-2}(d_2^2 + 2d_1^2), \quad (2)$$

де  $d_1$  і  $d_2$  - середні розрахункові діаметри накладання першого та другого обплетення в рукаві;  $P_{1-2}$  - проміжний тиск між першим і другим обплетеннями.



а (a)



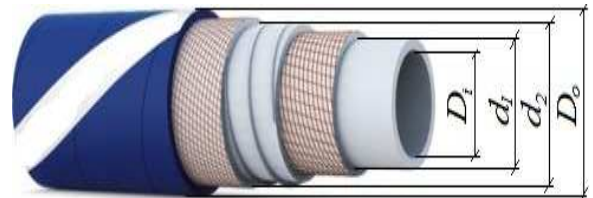
б (b)

**Рис. 1.** Схема рукава високого тиску: а – з одним металевим обплетенням 1SN; б – з двома металевими обплетеннями 2SN

**Fig. 1.** High pressure circuit: a – with a metal braid 1SN; b – with two metal braids 2SN

Тиск на перше (внутрішнє) обплетення визначається як

$$P_1 = P - P_{1-2}. \quad (3)$$



**Рис. 2.** Позначення діаметрів рукава високого тиску з двома металевими обплетеннями

**Fig. 2** Designation diameter high pressure hose with two metal braid

Тиск на друге (зовнішнє) обплетення

$$P_2 = P_{1-2}. \quad (4)$$

З урахуванням рівняння спільності деформацій і переміщень обплетень (2) рівняння тиску на перше обплетення (3) та друге (4) обплетення набудуть вигляду

$$P_1 = P_2 - \left( \frac{d_1^2}{d_2^2 + 2d_1^2} \right); \quad (5)$$

$$P_1 = \frac{Pd_1^2}{d_2^2 + 2d_1^2}. \quad (6)$$

Для подальших розрахунків необхідно визначити середні розрахункові діаметри накладки обплетень. При цьому діаметр накладки першого обплетення матиме вигляд

$$d_1 = D_i + 2(\delta_i - q \cdot d_{im}), \quad (7)$$

де  $q \cdot d_{im}$  – глибина проникнення металевого обплетення в товщину заготовки гумової камери ( $q \approx 0,5$  мм);  $\delta_i$  – товщина внутрішньої гумової камери (згідно з [1] мінімальна товщина рукавів діаметром до 16 мм включно складає не менше 1,5 мм; для рукавів діаметром від 16 до 20 мм – 2,0 мм; для рукавів діаметром більше 20 мм – зовнішнім). діаметр внутрішнього обплетення

$$d_{o1} = d_1 + 2 \cdot d_{im}. \quad (8)$$

Розрахунковий діаметр накладки другого металевого обплетення

$$d_2 = d_{o1} + 2 \cdot (\delta_r - q \cdot d_{im}), \quad (9)$$

де  $\delta_r$  – товщина гумового прошарку між металевими обплетеннями (приймаємо 1,5 мм).

Зовнішній діаметр другого обплетення

$$d_{o2} = d_2 + 2 \cdot d_{im}. \quad (10)$$

Аналогічно розраховуються діаметри накладок наступних обплетень.

При цьому, якщо знати товщину зовнішнього гумового шару  $\delta_0$ , що захищає рукав від впливу зовнішнього середовища, то можливо розрахувати зовнішній діаметр рукава за формулою

$$D_o = d_{o2} + 2 \cdot \delta_0. \quad (11)$$

Для рукава з одношаровим обплетенням тиск розраховується за наступною формулою [4]:

$$P_1 = 0,735 \cdot k_v \cdot N \cdot n \cdot \frac{1}{d_1^2}, \quad (12)$$

де  $k_v$  – міцність однієї нитки обплетення на розрив;  $N$  – кількість потоків дроту, що викладається шпулею обплітальної машини;  $n$  – число дротів на шпулі.

Вираз (12) можливо також застосовувати і для першого обплетення багатшарового обплетення рукава.

Міцність обплетення на розрив  $k_v$  може бути розрахована через зусилля розриву дроту [5]:

$$k_v = K \cdot g \approx 9,8 \cdot K. \quad (13)$$

Тиск на другому обплетенні через тиск на першому визначається як

$$P_2 = \frac{P_1}{\left( 1 - \frac{d_1^2}{d_2^2 + 2d_1^2} \right)} \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2 + 2d_1^2} = P_1 \cdot \frac{d_1^2}{d_2^2 + d_1^2}. \quad (14)$$

В такому випадку тиск на другому обплетенні

$$P_1 = 0,735 \cdot k_v \cdot N \cdot n \cdot \frac{1}{d_2^2 + d_1^2}. \quad (15)$$

З врахуванням попередніх залежностей рівняння для визначення тиску на розрив рукава з урахуванням (1) матиме вигляд

$$P_v = 0,735 \cdot k_v \cdot N \cdot n \times \left( \frac{1}{d_1^2} + \frac{1}{d_2^2 + d_1^2} \right) \frac{C_1}{C_2}, \quad (16)$$

де  $C_1$  та  $C_2$  – поправочні коефіцієнти [6].

Коефіцієнт  $C_1$  враховує неодноразовість розриву паралельно послідовних дротів у потоці (обплетенні):

$$C_1 = 1 - 0,015(n-1). \quad (17)$$

Коефіцієнт  $C_2$  враховує подовження (ε) матеріалу дроту в обплетенні:

$$C_2 = 1 + \frac{\epsilon}{l}. \quad (18)$$

Відповідно для рукава із більшою кількістю обплетень (наприклад, трьох) вираз для визначення тиску розриву матиме вигляд

$$P_w = 0,735 \cdot k_v \cdot N \cdot n \times \left( \frac{1}{d_1^2} + \frac{2d_2^2 + d_3^2}{d_1^2(d_2^2 + d_3^2) + d_2^2(d_1^2 + d_3^2)} \right) \frac{C_1}{C_2} \quad (19)$$

Відповідно до запропонованої математичної моделі розраховуємо розривний тиск  $P_y$  для рукавів високого тиску типу SN [7] різних діаметрів (табл. 1) при заданому коефіцієнті міцності металевго обплетення на розрив  $k_y$ . При цьому потрібно дотримуватися умов [8]: РВТ повинен бути герметичним при дослідженні статичним гідравлічним тиском  $2P_w$ , і мати не менш трикратного запасу міцності  $3P_w$ .

Подовження металевго низьковуглецевого дроту з покриттям відповідно до ГОСТ приймаємо рівним 12%. По залежностях (7) - (11) розрахуємо внутрішню геометрію рукава (табл. 2).

Кількість потоків дроту  $N$ , що викладається шпулевою машиною для обплетень та число дротів на шпулі  $n$  для кожного діаметра РВТ може бути в різних комбінаціях (табл. 3).

Згідно із наведеною математичною моделлю побудована залежність розривного тиску від діаметра РВТ та кількості металевих обплетень (рис.3).

Із збільшенням діаметра рукава розривний тиск зменшується, а зі збільшенням кількості – збільшується.

**Таблиця 1.** Параметри рукава високого тиску з двома обплетеннями (ISO 15540/15541)

**Table 1.** Options High pressure two braid (ISO 15540/15541)

Параметри	Познач.	1	2	3
Внутрішній діаметр рукава, мм	$D_i$	12,7	16	25,4
Зовнішній діаметр рукава, мм	$D_o$	22,2	25,4	38,1
Зовнішній діаметр по верхньому обплетені, мм	$d_{o2}$	18,9±1,0	23±1,0	33,5±1,0
Робочий тиск, МПа	$P_w$	21	16,5	12,5
Діаметр металевго дроту обплетення, мм	$d_{im}$	0,3±0,01	0,3±0,01	0,3±0,01
Зусилля розриву металевго дроту обплетення, кг	$K$	15,5...17,8	15,5...17,8	15,5...17,8

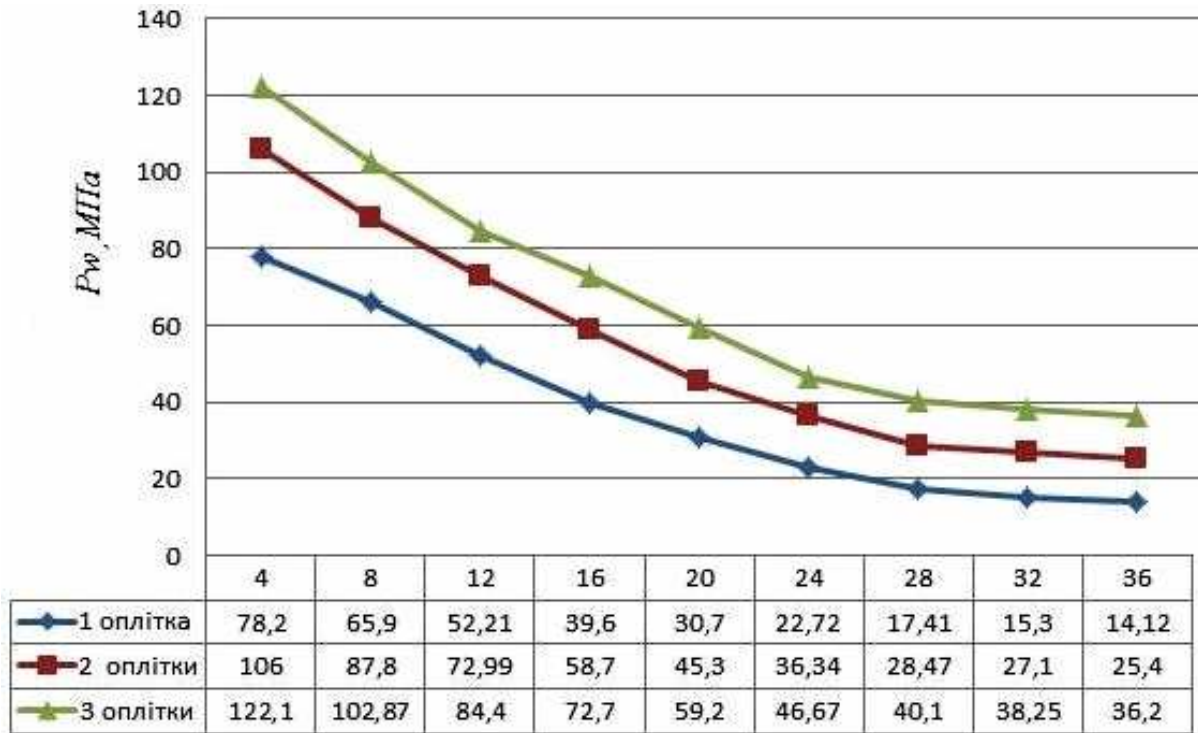
**Таблиця 2.** Розрахункові розміри геометрії рукава високого тиску

**Table 2.** Estimated size of geometry High pressure

Параметр	Познач.	1	2	3
Внутрішній діаметр рукава, мм	$D_i$	12	16	25
Товщина внутрішньої гумової камери, мм	$\delta_i$	2	2	2,5
Діаметр накладання першого металевго обплетення, мм	$d_1$	15,7	19,7	29,7
Зовнішній діаметр по внутрішньому металевому обплетеню, мм	$d_{o1}$	16,3	20,3	30,3
Товщина гумового прошарку між металевими обплетеннями, мм	$\delta_r$	1,5	1,5	1,5
Діаметр накладки другого металевго обплетення, мм	$d_2$	19	23	33
Зовнішній діаметр (розрахунковий) по зовнішньому металевому обплетені, мм	$d_{o2}$	19,6	23,6	33,6
Зовнішній діаметр (по ГОСТ) по зовнішньому металевому обплетені, мм	$d_{o2}$	19,9±1,0	23±1,0	34,5±1,0
Товщина зовнішнього гумового шару, мм	$\delta_o$	2,5	2,5	2,5
Зовнішній (розрахунковий) діаметр рукава, мм	$D_o$	24,6	28,6	38,6
Зовнішній (по ГОСТУ) діаметр рукава, мм	$D_o$	24,6±1,0	27,8±1,0	39,7±1,0

**Таблиця 3.** Відповідність кількості потоків і числа дротів в залежності від діаметра рукава  
**Table 3.** Matching the number of threads and number of wires according to the diameter of the sleeve

Діаметр рукава, мм	Кількість потоків, $N$	24	36	48	64	96
$D_i = 6$	Кількість дротів, $n$	3	-	-	-	-
$D_i = 8$	Кількість дротів, $n$	4	-	-	-	-
$D_i = 12$	Кількість дротів, $n$	6	4	3	-	-
$D_i = 16$	Кількість дротів, $n$	8	5	4	3	-
$D_i = 20$	Кількість дротів, $n$	10	6	5	3	-
$D_i = 25$	Кількість дротів, $n$	12	8	6	4	3
$D_i = 32$	Кількість дротів, $n$	15	10	7	5	3



**Рис. 3.** Залежність тиску розриву від діаметра рукава та кількості обплетень

**Fig. 3** Dependence of pressure to break the diameter of the sleeve and the number of braided metal

На рис. 4 представлено розподіл навантажень в каркасі рукава у залежності від кількості обплетень на прикладі рукава високого тиску діаметром 12 мм. Кожне наступне обплетення сприймає менше навантаження, ніж попереднє. Якщо прийняти навантаження на першому внутрішньому обплетенні за  $\eta_1 = 100\%$  то навантаження на наступних обплетеннях буде становити  $\eta_2 = 39,8\%$ ,  $\eta_3 = 21,8\%$ .

Якщо припустити, що в «тонкошарових» рукавах (формату SC – компактні рукави високого тиску) величини діаметрів накладання обплетень близькі між собою

( $d_1 = d_2 = \dots = d_i$ ), то розрахункові залежності (12), (16), (19) можуть прийняти наступний спрощений вигляд:

$$P_w = 0,735 \cdot k_v \cdot N \cdot n \cdot \sum_{s=1}^i \frac{1}{2^{s-1} \cdot d_1^2} \cdot \frac{C_1}{C_2} \quad (20)$$

В цьому випадку розривний тиск для рукавів з переплетенням більше одного збільшиться в порівнянні з відповідними рукавами, що мають між металевими обплетеннями проміжний «товстий» гумовий шар.

На рис. 5 представлено порівняння розподілу тиску в рукавах розрахованої геометрії (SN) та «тонкошарових» рукавах

високого тиску (SC) на прикладі рукава з  $D_i = 12$  мм.

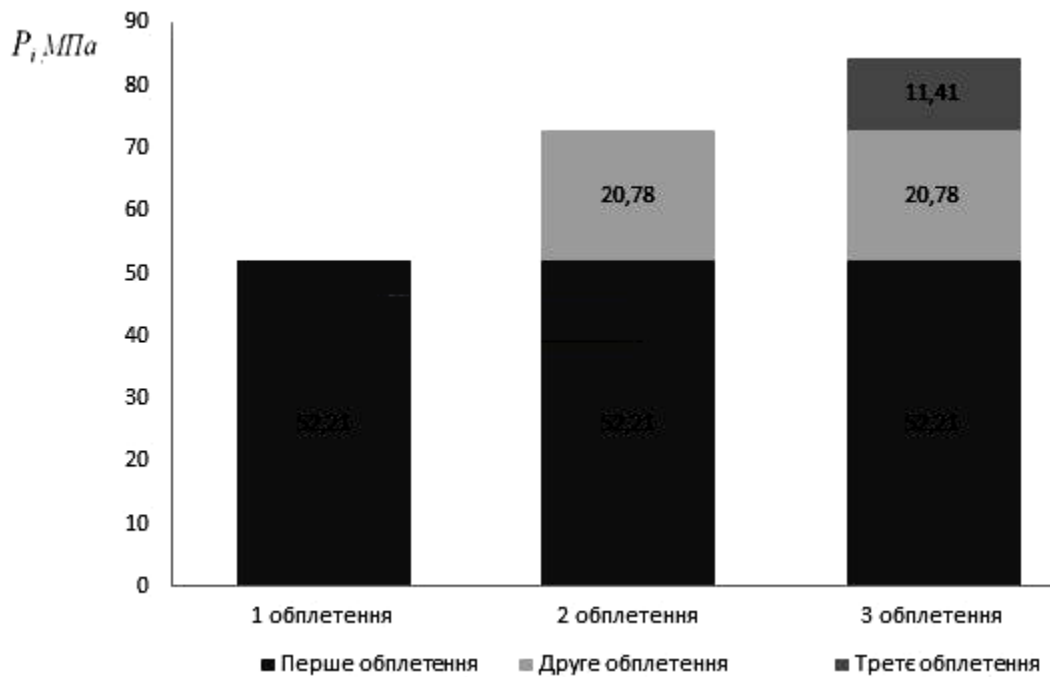


Рис. 4. Розподіл навантажень в каркасі рукава високого тиску (типу SN) в залежності від кількості обплетень

Fig. 4 The distribution of loads in the frame of a high pressure hose (type SN) depending on the number of braided

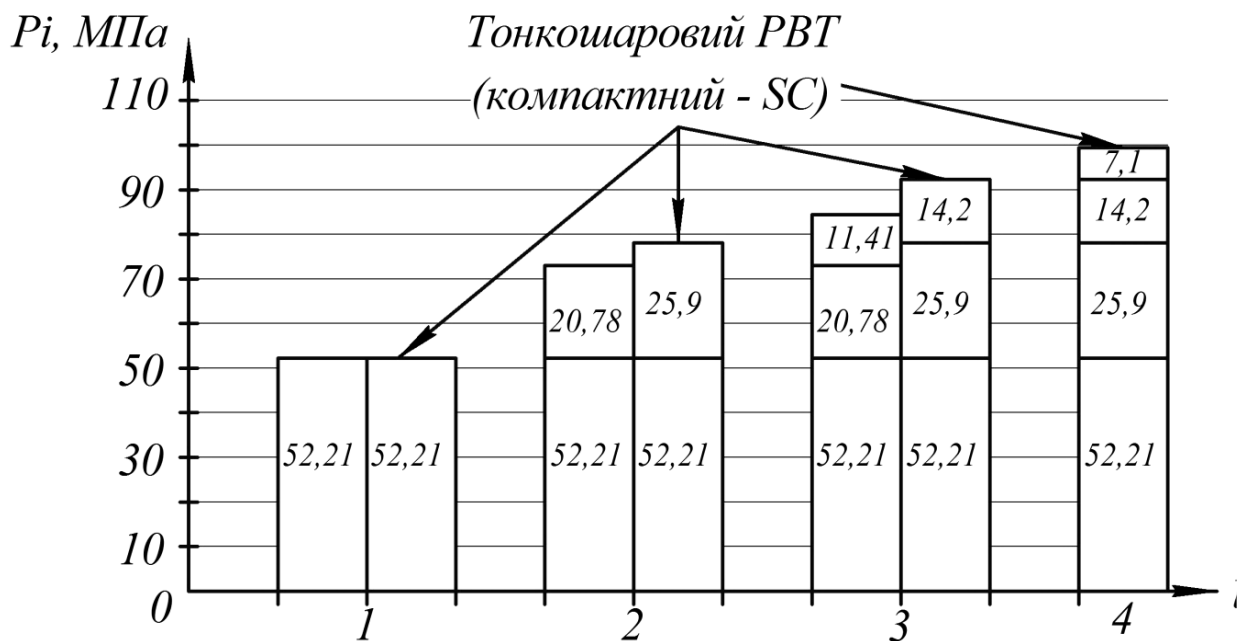


Рис. 5. Порівняльний розподіл тиску в каркасах рукавів високого тиску формату SN та SC

Fig. 5. Comparative pressure distribution frames in the format of high pressure and SN SC

В «тонкошаровому» рукаві високого тиску (SC) перше металеве обплетення сприймає 100%, друге металеве обплетення сприймає  $\eta_2^* = 49,6\%$  від навантаження першого, третє -  $\eta_3^* = 27,2\%$ , четверте -  $\eta_4^* = 13,5\%$ , і т.д. З цього випливає, що збільшення кількості металевих обплетень в рукаві високого тиску до великої кількості нерационально.

## ВИСНОВКИ

На підставі проведених досліджень та розрахунків можна зробити наступні висновки:

- частки гідравлічного тиску, що сприймаються металевим обплетенням рукава високого тиску, зменшуються, починаючи від першого (внутрішнього) до наступних;
- збільшення числа металевих обплетень веде до збільшення жорсткості конструкції рукава, що знижує радіус вигину, а розривний тиск при цьому зростає незначно. Тому для збільшення розривного тиску можна зменшувати товщину гумового прошарку між обплетенням або використовувати дріт з більшим зусиллям розриву;
- побудована математична модель допомагає ефективно розраховувати (в тому числі і розривне зусилля) та підбирати рукави високого тиску.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *ГОСТ-6286-73*. Рукава резиновые высокого давления с металлической оплеткой неармированные. Технические условия. Введ. 1974-07-01. М. Изд-во стандартов, переизд. 2003. 16 с.
2. *Geovana Pereira Drumond* Study of an alternative material to manufacture layered hydraulic hoses / Geovana Pereira Drumond, Ilson Paranhos Pasqualino, Marysilvia Ferreira da Costa. *Polymer Testing*, Volume 53, August 2016, Pages 29-39.
3. *Лоценов П. Ю.* Способ диагностирования рукавов высокого давления / Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник Выпуск № 3 (86). – 2012. – С. 72-84.

4. *Яркин А.В.* Повышение работоспособности рукавов высокого давления гидропривода при эксплуатации в суровых климатических условиях / *А.В. Яркин, Ю.Г. Сысоев, А.Р. Крук, В.А. Костырченко, Т.М. Мадьяров.* Инженерный вестник Дона, №3. – 2014. – С. 23-32.
5. *Беляев Н.М.* Сопrotивление материалов / Н.М. Беляев. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука». – 1976. – 608 с.
6. *Зозуля В.В.* Механика материалов / *В.В. Зозуля, А.В. Мартыненко, А.Н. Лукин.* Харьков: Изд-во. Национ. ун-та внутр. дел, 2001. – 404 с.
7. [http://hydrohouse.com.ua/uploads/media/B\\_rukava\\_srednego\\_davlenia.pdf](http://hydrohouse.com.ua/uploads/media/B_rukava_srednego_davlenia.pdf)
8. *Мартин Дж.М.* Производство и применение резинотехнических изделий: пер. с англ. / Дж.М. Мартин. - СПб.: Профессия. 2006. 477 с.

## REFERENCES

1. *GOST-6286-73, 2003.* Rukava rezinovyie vyisokogo davleniya s metallicheskoj opletkoy nearmirovannyye. Tehnicheskie usloviya. Vved. 1974-07-01, Moscow, Izd-vo standartov, pereizd, 16. – (in Russian).
2. *Geovana Pereira Drumond, 2016.* Study of an alternative material to manufacture layered hydraulic hoses. *Polymer Testing Publ.*, Vol. 53, 29-39.
3. *Loschenov P. Yu., 2012.* Sposob diagnostirovaniya rukavov vyisokogo davleniya/ *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa, Lesnoy vestnik*, No. 3 (86). – (in Russian).
4. *Yarkin A.V., 2014.* Povyishenie rabotosposobnosti rukavov vyisokogo davleniya gidroprivoda pri ekspluatatsii v surovyyih klimaticheskikh usloviyah. *Inzhenernyiy vestnik Dona Publ.*, №3. – (in Russian).
5. *Belyaev N. M., 1976.* Soprotivlenie materialov. Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury izd-va «Nauka». – (in Russian).
6. *Zozulya V.V., Martynenko A.V., Lukin A.N. 2001.* Mehanika materialov. *Kharkov, Izd-vo Natsion. un-ta vnutr. Publ.*, 404. – (in Russian)
7. [http://hydrohouse.com.ua/uploads/media/B\\_rukava\\_srednego\\_davlenia.pdf](http://hydrohouse.com.ua/uploads/media/B_rukava_srednego_davlenia.pdf)
8. *Martin Dzh.M., 2006.* Proizvodstvo i primeneniye rezinotekhnicheskikh izdeliy: per.s angl. *SPb., Professiya Publ.*, 477.