

Визначення механічних властивостей напірного пожежного рукава типу «Т»

**О. О. Ларін, О. О. Морозов С. Ю. Назаренко, Г. О. Чернобай,
А. Я. Калиновський Р. І. Коваленко, С. О. Федулова, П. Є. Пустовойтов**

Представлені експериментальні дослідження з визначення механічних властивостей (пружних та дисипативних) напірного пожежного рукава типу «Т» із внутрішнім діаметром 66 мм в умовах статичного навантаження. Експеримент проведено на дослідній установці, яка дає можливість заміру сили та деформації. В ході роботи проведено низку натурних експериментів на розтяг зі зразком в умовах статичних циклів навантаження-розвантаження. Випробування склалися з 5 циклів (режими) навантаження-розвантаження, які проводилися із двохвилинним інтервалом. З урахуванням експериментальних даних визначено модуль пружності при розтяганні матеріалу рукава у поздовжньому (вздовж основи) напрямку. Встановлено, що чисельні результати механічних властивостей залежать від «історії» навантаження рукава, тобто на перших двох режимах навантаження модулі пружності збільшувалися і лише потім на наступних – стабілізувалися. Вказане, разом із суттєвим зменшенням залишкових деформацій, посилює пружні властивості матеріалу пожежного рукава.

Результати проведених досліджень показали, що при перших двох циклах матеріал демонструє прояв короткочасної повзучості, яка стабілізується на 4–5 режимі. Для узагальнення експериментальних досліджень результати апроксимовано відповідними лініями трендів. Було визначено криві деформування зразків, що в умовах циклічного навантаження-розвантаження формували петлі гістерезису. Отримані петлі гістерезису в ході дослідження показали, що при перших двох режимах петлі зазнають кількісних та якісних змін, а саме, зменшується нахил петлі гістерезису та її площа.

Встановлено, що зміна властивостей матеріалу пожежного рукава при послідовних циклах деформацій навантаження-розвантаження є зворотною, проміжки між циклами деформування призводять до часткового відновлення механічних характеристик, наближаючи їх до початкових значень. Час релаксації становить від кількох годин до кількох діб і навіть тижнів, що в значній мірі залежить від величини попередньої відносної деформації

Ключові слова: напірний пожежний рукав, модуль пружності, гістерезис, дисипативні властивості

1. Вступ

Сучасний розвиток промисловості характеризується застосуванням та розширеним використанням композитних матеріалів, що складаються з еластичної, зокрема гумової, матриці та різноманітного кордного посилення. Цей вид

матеріалів активно застосовується у сучасній техніці, будівництві, автомобілебудуванні, апаратах і приладах. Зокрема, широке застосування знайшли спеціальні шланги та напірні рукава, які у якості гнучких трубопроводів здійснюють транспортування під високим тиском різних рідин, газів, пару, пульпи, абразивних сумішей та сипучих матеріалів. Також дані композитні матеріали застосовуються при виготовленні напірних пожежних рукавів (НПР), що можуть складатися з декількох шарів гуми та корду, які в свою чергу конструктивно схожі з спеціальними шлангами. Крім того, гумокордні композити використовуються при виготовленні автомобільних та авіаційних шин. Таким чином, композитні матеріали впливають на характеристики надійності машин, їх функціональні показники та безпеку експлуатації.

Напірні пожежні рукави, разом з іншим пожежним устаткуванням в підрозділах аварійно-рятувальних формувань (АРФ), є одним із основних видів пожежного обладнання (ПО) і від їх справного стану залежить успіх гасіння пожеж [1, 2]. Гасіння пожеж – це складний процес який супроводжується забрудненням атмосфери [3] від продуктів неповного згоряння, тривалої дії негативного впливу високої температури, руйнування будівельних конструкцій, і т. д. При виникненні надскладних пожеж, таких як ландшафтні пожежі [4], або на небезпечних об'єктах, наприклад на об'єктах нафтогазової промисловості [5], АРФ використовують велику кількість ПО та техніки. Але успішне проведення робіт по гасінню пожежі АРФ залежить не тільки від часу зосередження сил та засобів на місці виклику [6], але і від показників безвідмовної роботи ПО [7]. Під час експлуатації НПР в них відбувається процес накопичення втоми, що може призвести до їх відмови.

Надійне і безпечно використання НПР обумовлюється дотриманням нормативних вимог до їх експлуатації і обслуговування, серед яких чільне місце займають гідравлічні випробування на герметичність за надлишковим тиском. Випробування пожежних рукавів проводяться під час планових перевірок не менше одного разу на рік, а також після ремонту. Дана методика випробувань визначає лише цілісність та герметичність напірних пожежних рукавів і спрямована на спрощену оцінку надійності виробу.

Разом із тим, відмова (пошкодження) напірних пожежних рукавів збільшує час ліквідації пожежі, що в свою чергу може призвести до суттєвих збитків, а, інколи, і катастрофічних наслідків.

Таким чином, заходи, що спрямовані на отримання комплексної характеристики надійності матеріалів пожежних рукавів та засобів їх надійного випробування, є важливою науково-практичною задачею.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Пожежним рукавам, як одному із важливих видів пожежного обладнання, приділена велика кількість наукових праць, які в свою чергу здебільшого зводяться до розрахунку витрат тиску в гідравлічних мережах. В роботах [8, 9] отримано експериментальні дані по гідравлічному опору напірних пожежних рукавів при перебігу води в середині рукава. Було визначено втрати тиску та

встановлено, що при додаванні гелю в воду гідравлічний опір знижується. Визначення надійності НПП в експлуатації в задачі дослідження не входило.

В роботах [10, 11] наведені результати теоретичних і експериментальних досліджень міцності силового каркасу (ткацького чохла) напірних пожежних рукавів. Було встановлено, що силовий каркас повністю сприймає зусилля, які обумовлені наявністю гідравлічної дії внутрішнього тиску рідини усередині рукава. Авторами розроблена методика раціонального проектування НПП, визначено доцільні параметри ткани несучої оболонки. Розглянуті роботи мають фундаментальне значення для удосконалення конструкцій НПП та технології їх виробництва. Але задача оцінки надійності НПП при наявності дефектів в експлуатації в них не досліджувалась.

Структура напірних пожежних рукавів дуже схожа на конструкції деяких гумових шлангів та напірних рукавів, що використовуються в якості гнучких трубопроводів для з'єднання і компенсації взаємних переміщень елементів різних видів машин. Тому доцільно розширити літературний пошук щодо надійності конструктивних елементів цих напірних рукавів.

Відмова напірних рукавів є типовим явищем в машинобудуванні. В роботі [12] було представлено аналіз відмов рукавів. Встановлено, що близько 30 % всіх відмов в машинах приходяться на пошкодження напірних рукавів. Найпоширенішими типами відмов є пошкодження поверхні рукава [13, 14] та його розшарування [15, 16]. Причинами відмов є силове перевантаження, накопичення втомливості в наслідок циклічної дії навантаження [15, 17, 18] та пошкодження, які сформувались внаслідок старіння та деградації властивостей матеріалу [19, 20]. Це в свою чергу необхідно враховувати при вивченні показників надійності конструкції гумоподібних матеріалів [21]. Встановлено, що збільшення шарів обплетення веде до зростання жорсткості конструкції рукава, яка в свою чергу знижує еластичність рукава при згинанні, а розривний тиск при цьому зростає неістотно. В цих роботах докладно визначені та проаналізовані причини виходи рукавів з ладу, але фактори, що призвели до цих відмов та їх вплив на надійність рукавів в експлуатації, не досліджені.

В роботах [12, 13] представлені результати аналізу вибору методу неруйнівного контролю. Відповідно для кожної роботи було вибрано свій метод діагностування. У роботі [12] розглянуто акустичний метод випробування, який визначив закономірність зміни параметрів технічного стану рукавів. Метою проведення цих досліджень було вирішення задачі виявлення прихованого дефекту та прогнозування раптових відмов рукавів на спеціальних машинах. Відповідно, запропоновано періодичний контроль технічного стану рукавів. В роботі [13] запропоновано сучасний метод діагностики, який полягає у використанні промислової томографії (Zeiss Metrotom 1500). Ця робота була направлена на аналіз та опис руйнівного процесу поверхні гумових шлангів. В цих роботах запропоновані сучасні методи випробування, але їх собівартість та трудомісткість в реальних умовах сьогодення проблематична.

В роботах [14, 15] розглядається циклічна деформація гальмівних шлангів, дослідження показують, що існує відносно слабка між шарова міцність, і в наслідок дії відповідних навантажень з'являються внутрішні початкові тріщини, які по-

ступово досягають зовнішнього гумового шару, що призводить до остаточного розриву. В роботах [17, 18] були проведені дослідження з циклічної деформації композитних матеріалів, які використовуються для виготовлення напірних рукавів. Експериментально визначено, що під час циклічної деформації виникає самонагрівання експериментальних зразків [17], що призводить до зменшення ресурсу експлуатації. В роботі [18] досліджено зміни циклічних деформацій при перепадах температур повітря (від -20 до 40 °C). Було визначено, що при зниженні температури повітря нижче нуля рівень напружень в матеріалі значно збільшується. В [16] було проведено візуальне та мікроскопічне обстеження місць з дефектом, встановлено, що за рахунок змішування різних типів гуми в матеріалі рукава зароджуються дефекти, внаслідок недостатнього механічного зв'язку окремих компонентів. В роботах [19, 20] наведені результати деградації фізичних властивостей різних еластомірів, які застосовуються для виготовлення напірних рукавів. Результати, які представлені в роботі [19] спрямовані на дослідження порівняльної деградації фізичних властивостей матеріалу рукава при впливі пальмового біодизеля. Експериментальні дослідження проводились шляхом занурення рукава в деякі види дизельних палив та його витримки протягом тисячі годин. Зміни властивостей фіксувались кожні 250 годин. В роботі [20] було представлено результати обстеження рукава високого тиску, який під час експлуатації зруйнувався в наслідок розриву. Для обстеження рукава була застосована оптична мікроскопія, яка виявила, що армуючі шари (ткацькі плетіння) деградували та перетворились в склоподібні матеріали, що в подальшому призвело до розриву. В цих роботах докладно визначені та проаналізовані причини виходу рукавів з ладу, але вплив цих факторів на надійність рукавів в експлуатації не досліджений.

В роботах [21–23] використовуються аналітичні моделі та методи розрахунку напірних рукавів (гумо-кордних шлангів), що базуються на введенні деяких припущень та спрощень. Використання даних методів у практичному застосуванні не доцільно, оскільки в роботах не враховуються конструктивні та геометричні особливості конструктивних елементів напірних рукавів.

В роботах [14, 16, 24–30] розглядаються методи, які базуються на використанні методу скінчених елементів. В роботах [24, 25] розглядалися питання надійності гальмівних шлангів. Встановлено що під час експлуатації передньої гальмівної системи транспортного засобу в гальмівних шлангах виникають вертикальні та горизонтальні деформації [25] та деформації кручення [24] під час повороту. В [24] встановлено, що з використанням шарів тканини у оплетені, збільшить надійність виробу за рахунок гомогенізації матеріалу рукава. Розглянуто детальна модель геометрії шару тканини у оплетені. Проведені дослідження на скручування рукава максимальний кут закручування становив 180° . Модель показала значне відхилення з експериментальними дослідженнями, тому робота в подальшому потребує в доопрацюванні. Робота [25] є продовження роботи [24], та більш детально розглянуті питання вертикальних та горизонтальних деформацій. Використовуючи метод скінчених елементів було змодельовано циклічні напруження, які виникають під час цих деформаціях. В цих роботах [26–30] розглядаються питання надійності кріплення у місцях з'єднання напірних рукавів. В роботі [26] представлені результати аналізу ви-

ходу з ладу шлангів високого тиску. Встановлено, що одним із факторів виходу з ладу рукавів є зовнішні пошкодження, що формувалися при дії гострих металічних втулок. Завдяки методу кінцевих елементів було проаналізовано розподіл та концентрацію напружень по поверхні рукава. В роботах [27, 28] були проведенні дослідження руйнівного процесу в місцях з'єднувальної арматури. Встановлено, що під час опресування на зовнішній поверхні гуми виникають мікрodefекти (тріщини) [27], крім того на деяких зразках спостерігається різна геометрія поперечних перерізів на зовнішніх кромках, що в свою чергу сприяє формуванню концентрації напружень. В роботах [28–30] було встановлено, що під час опресування з'єднувальної арматури виникають напруження, які деформують не тільки рукава високого тиску [29, 30], але і сам ніпель [28].

Таким чином, метод скінчених елементів є одним із сучасних і перспективних методів вивчення параметрів, як готової продукції, так і матеріалів, що застосовується при виготовленні гумових шлангів та напірних рукавів. Зазначимо, що робіт по моделюванню напірних пожежних рукавів методами скінчених елементів не виявлено. Це обумовлено як суттєвою не лінійністю відповідних математичних моделей, так і наявністю ортотропії механічних характеристик та гетерогенності будови конструкції напірних рукавів. Враховуючи, що під час експлуатації напірні пожежні рукави піддаються різним типам навантаження, які безпосередньо змінюють їх механічні властивості, процес моделювання значно ускладнюється.

В результаті огляду літературних джерел [8–30] були виявлено, що механічні властивості рукавів, а саме, модулі пружності та коефіцієнти дисипації при різних деформаціях не досліджені іншими авторами. Відсутність таких даних пояснюється тим, що ця проблематика не стосувалась тем досліджень відповідних авторів. Це дозволило сформулювати проблематику теоретичних досліджень з оцінки надійності НПР в експлуатації. Для більшої достовірності їх необхідно провести комплекс випробувань з визначення механічних характеристик, а саме, пружних та дисипативних властивостей напірних пожежних рукавів типу «Т» з внутрішнім діаметром 66 мм.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є визначення пружних та дисипативних властивостей напірних пожежних рукавів, в умовах статичних циклів навантаження-розвантаження для наступних розрахунків надійності пожежних рукавів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- провести експериментальні дослідження з визначення пружних властивостей напірних пожежних рукавів;
- провести експериментальні дослідження з визначення дисипативних властивостей напірних пожежних рукавів.

4. Методика експериментальних досліджень з визначення пружних та дисипативних властивостей напірного пожежного рукава типу «Т»

В ході роботи було проведено низку натурних експериментів з розтягу зразків нових напірних пожежних рукавів типу «Т» з внутрішнім діаметром 66 мм

в умовах статичних циклів навантаження-розвантаження і статистичною обробкою результатів.

Напірні пожежні рукави (НПР) виготовляються згідно з ДСТУ 3810-98, їх конструкція складається із силового каркасу (ткацького чохла) (3), внутрішнього пружного гідроізоляційного шару (1) (рис. 1). В деяких випадках силовий каркас просочується зовнішнім пружним покриттям (4), що служить для його захисту від абразивного зносу та активних речовин.

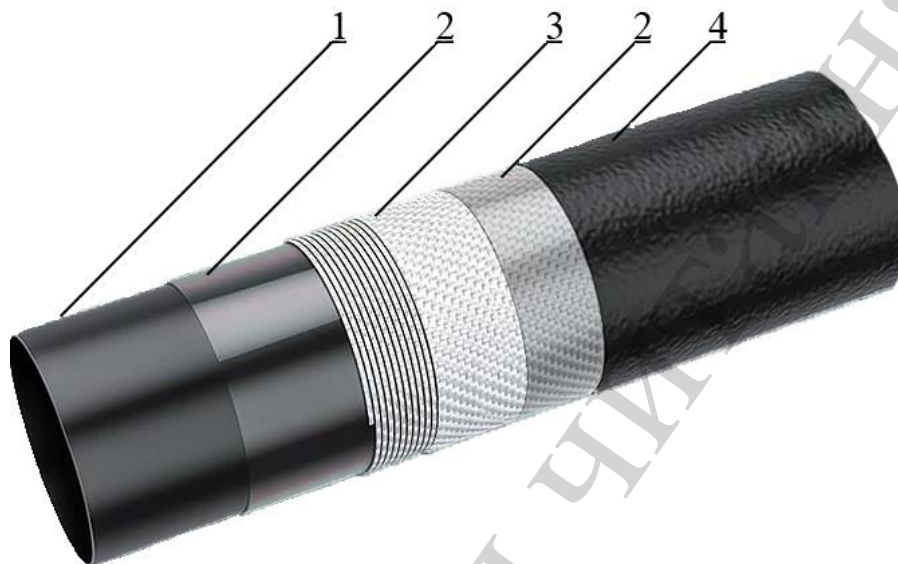


Рис. 1. Конструкція напірного пожежного рукава: 1 – герметизуючий шар; 2 – клеєвий шар; 3 – силовий каркас; 4 – захисне покриття

Дослідний зразок було відокремлено від пожежного рукава типу «Т» з внутрішнім діаметром 66 мм виробництва ТОВ МІК, виготовленого за ДСТУ 3810-98 серт. UA 1.182.066877-13. Фрагменти матеріалу рукавів, мали фактичну загальну довжину зразка 100 мм, а робочу зону довжиною $l=78$ мм (рис. 2), ширину – 100 мм та товщину – 1,6 мм.

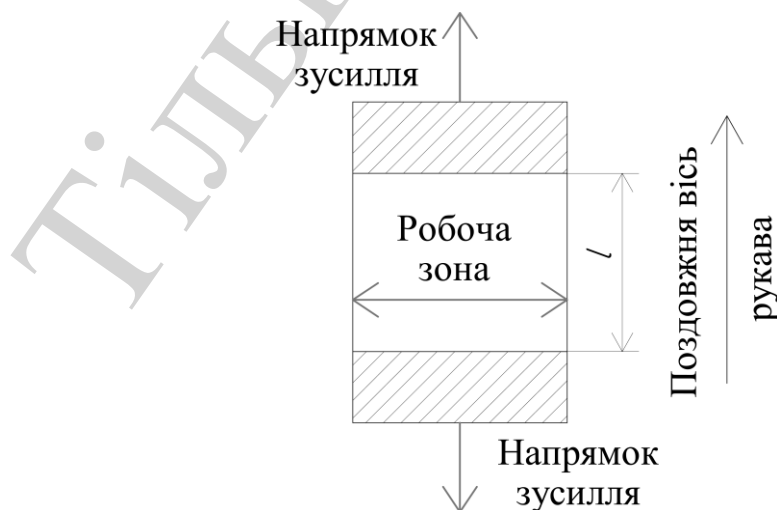


Рис. 2. Випробувальний зразок пожежного рукава

Для проведення відповідних робіт було використано дослідну установку ДМ–30 М (Завод випробувальних машин, СРСР). Зразок фіксувався в експериментальній установці за допомогою механічних затискачів. Задавалося жорстке навантаження, тобто задавались фіксовані значення деформації зразків, при цьому вимірювались зусилля штатним механічним динамометром. Механічний динамометр перед застосуванням проходив перевірку шляхом послідовного навантаження із використанням зразкового динамометра і наступною побудовою відповідних характеристик та визначенням необхідних коефіцієнтів.

Зразки навантажувались з постійним подовженням зразка ($\Delta=0,5$ мм). Експерименти проводились в двох окремих варіантах. Першими було проведено експерименти на визначення модулю пружності у поздовжньому напрямку. Другим варіантом експериментів були випробування на визначення в'язкопружних властивостей матеріалу.

Кожен експеримент проводився із зразками, які були відокремлені від різних ділянок різних рукавів, тобто щонайменше 9-ть зразків з наступною статистичною обробкою результатів, а також для перевірки їх повторюваності.

4. 1. Експериментальні дослідження поздовжньої пружності напірних пожежних рукавів

Початковий (1) цикл навантаження проводився з недеформованим фрагментом пожежного рукава довжиною 78 мм.

Максимальна величина деформації становила: $\Delta l_1^{\max} = 9,5 \cdot 10^{-3}$ м при навантаженні $F_1^{\max} = 1128$ Н. Результати випробувань наведені в табл. 1.

Після розвантаження залишкова деформація фрагменту становила: $\Delta l_1^{\text{зал}} = 5,0 \cdot 10^{-3}$ м.

При повторному циклі (2), який було проведено через дві хвилини після першого, максимальна величина деформації становила: $\Delta l_2^{\text{зал}} = 9,5 \cdot 10^{-3}$ м при навантаженні $F_1^{\max} = 1080$ Н.

Після розвантаження залишкова деформація фрагменту становила: $\Delta l_2^{\text{зал}} = 6,0 \cdot 10^{-3}$ м.

Числові параметри наступних трьох циклів навантаження (3)–(5), які було проведено з аналогічними двохвилинними інтервалами, практично не відрізняються один від одного, що дозволило їх усереднити. Максимальна величина деформації на цих режимах становила: $\Delta l_{3-5}^{\text{зал}} = 9,5 \cdot 10^{-3}$ м при середньому навантаженні $F_{3-5}^{\max} = 1064$ Н.

Залишкова деформація після розвантаження була відсутня.

Таблиця 1

Результати експериментальних випробувань НПР

Δ , мм	Навантаження – F , Н				
	Цикл 1	Цикл 2	Цикл 3	Цикл 4	Цикл 5
	Н	Н	Н	Н	Н
0,0	0000	–	–	–	–
0,5	0192	–	–	–	–
1,0	0288	–	–	–	–
1,5	0312	–	–	–	–
2,0	0336	–	–	–	–
2,5	0360	–	–	–	–
3,0	0432	–	–	–	–
3,5	0456	–	–	–	–
4,0	0480	–	–	–	–
4,5	0528	–	–	–	–
5,0	0600	0000	–	–	–
5,5	0672	0192	–	–	–
6,0	0720	0336	0000	0000	0000
6,5	0768	0432	0240	0192	0240
7,0	0840	0600	0432	0336	0432
7,5	0912	0720	0576	0456	0528
8,0	0960	0864	0720	0672	0720
8,5	1008	0960	0912	0768	0864
9,0	1080	1056	0960	0912	1008
9,5	1128	1080	1080	1008	1104

4. 2. Результати експериментальних досліджень поздовжньої пружності напірних пожежних рукавів

Графіки, які відповідають статистично оброблених результатам випробувань з навантаження, наведені на рис. 3.

Майже лінійна залежність між навантаженням та деформацією фрагментів пожежних рукавів дозволяє визначити в першому наближенні (без урахування зміни розмірів зразка внаслідок деформації) усереднений модуль пружності (E) його матеріалу в поздовжньому напрямку:

$$E_i = \frac{F_i^{\max} \ell}{(\Delta \ell_i^{\max} - \Delta \ell_{i-1}^{\text{зал}}) \delta S}, \quad (1)$$

де: E_i – модуль пружності, визначений для i -го циклу; F_i^{\max} – максимальне навантаження i -го циклу; ℓ – довжина робочої зони; $\Delta \ell_i^{\max}$ – максимальна деформація i -го циклу; $\Delta \ell_{i-1}^{\text{зал}}$ – залишкова деформація попереднього циклу; δ – товщина матеріалу зразка; S – ширина робочої зони фрагменту.

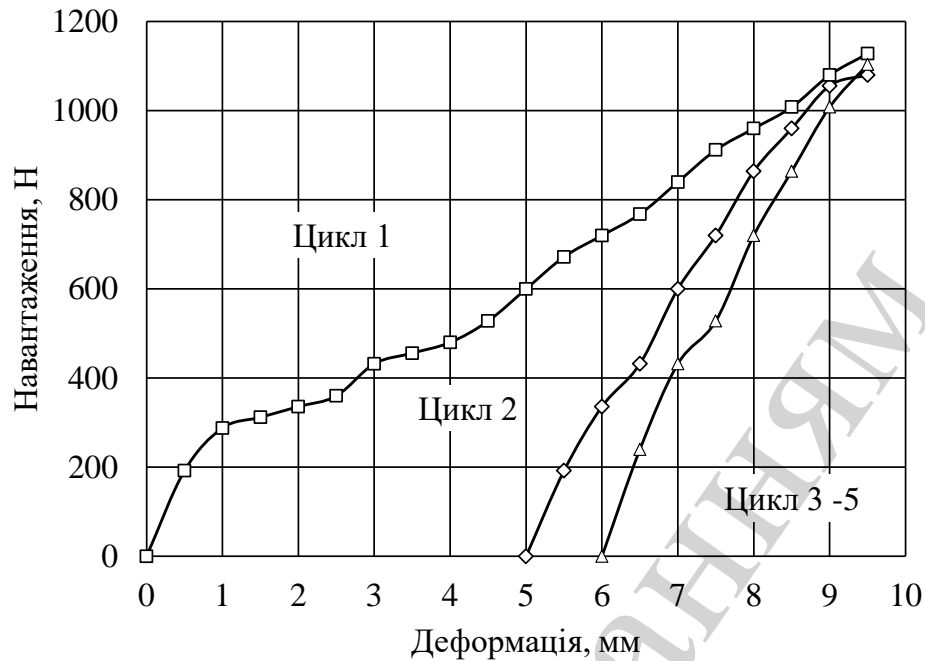


Рис. 3. Діаграми навантажень зразків матеріалу НІР

З урахуванням статистично оброблених експериментальних даних (табл. 1) для відповідних циклів навантаження модуль пружності становить:

$$E_1=60,7 \text{ МПа};$$

$$E_2=117 \text{ МПа};$$

$$E_{3-5}=148 \text{ МПа}.$$

Таким чином, модулі пружності спочатку збільшуються, а на 3–5 випробуваннях стабілізуються.

4. 3. Експериментальні дослідження дисипативних властивостей напірних пожежних рукавів в поздовжньому напрямку

Експерименти з визначення дисипативних властивостей НІР в поздовжньому напрямку проводились одночасно з визначенням пружних характеристик. Результати досліджень після статистичної обробки наведені в табл. 2.

Результати статистично оброблених експериментальних досліджень (табл. 2) апроксимовані відповідними трендами, графіки яких наведені на рис. 4–6.

Графіки на рис. 4 відповідають трендам початкового циклу 1 навантаження-розвантаження недеформованих фрагментів матеріалу НІР.

Графіки на рис. 5 відповідають поліноміальним трендам циклу 2 навантаження-розвантаження фрагментів матеріалу НІР.

Таблиця 2

Результати експериментальних випробувань ННР

Δ , мм	Навантаження – F , Н									
	Цикл 1		Цикл 2		Цикл 3		Цикл 4		Цикл 5	
	Н	Р	Н	Р	Н	Р	Н	Р	Н	Р
0,0	0000	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,5	0192	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,0	0288	–	–	–	–	–	–	–	–	–
1,5	0312	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,0	0336	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2,5	0360	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,0	0432	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3,5	0456	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,0	0480	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,5	0528	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5,0	0600	0000	0000	–	–	–	–	–	–	–
5,5	0672	0048	0192	–	–	–	–	–	–	–
6,0	0720	0144	0336	0000	0000	0000	0000	0000	0000	0000
6,5	0768	0240	0432	0120	0240	0048	0192	0048	0240	0048
7,0	0840	0408	0600	0240	0432	0144	0336	0096	0432	0120
7,5	0912	0480	0720	0384	0576	0240	0456	0240	0528	0240
8,0	0960	0600	0864	0600	0720	0384	0672	0360	0720	0432
8,5	1008	0720	0960	0720	0912	0576	0768	0480	0864	0672
9,0	1080	0960	1056	0864	0960	0720	0912	0792	1008	0864
9,5	1128	1128	1080	1080	1080	1080	1008	1008	1104	1104

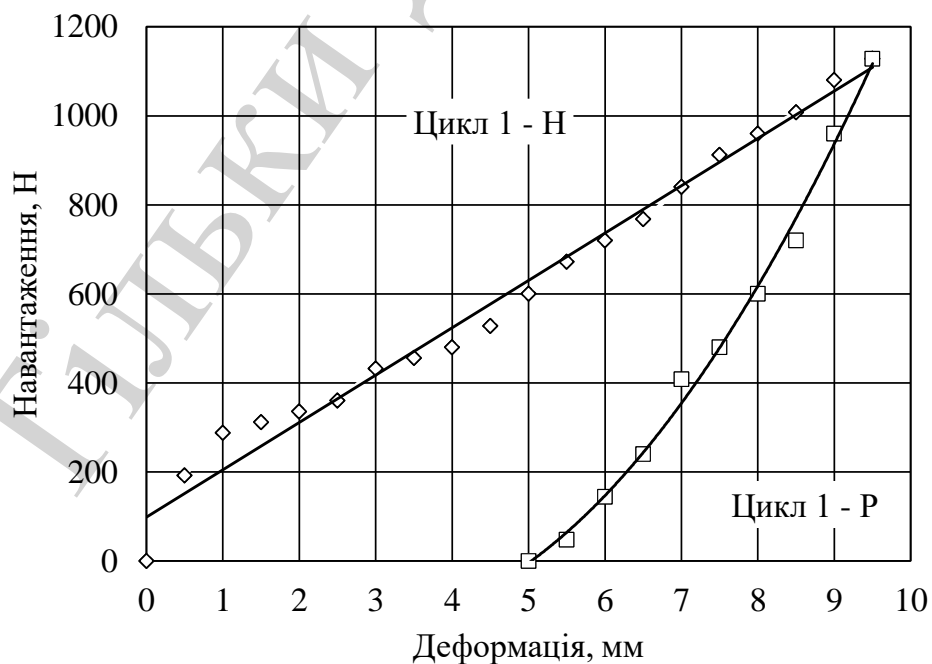


Рис. 4. Графіки трендів циклу 1. Н – навантаження Р – розвантаження

Наступні три цикли навантаження-розвантаження були проведені з аналогічними часовими інтервалами. Числові параметри випробувань практично не відрізняються один від одного, що дозволило їх усереднити.

Графіки на рис. 6 відповідають поліноміальним трендам циклів 3–5 навантаження-розвантаження фрагментів матеріалу НПР.

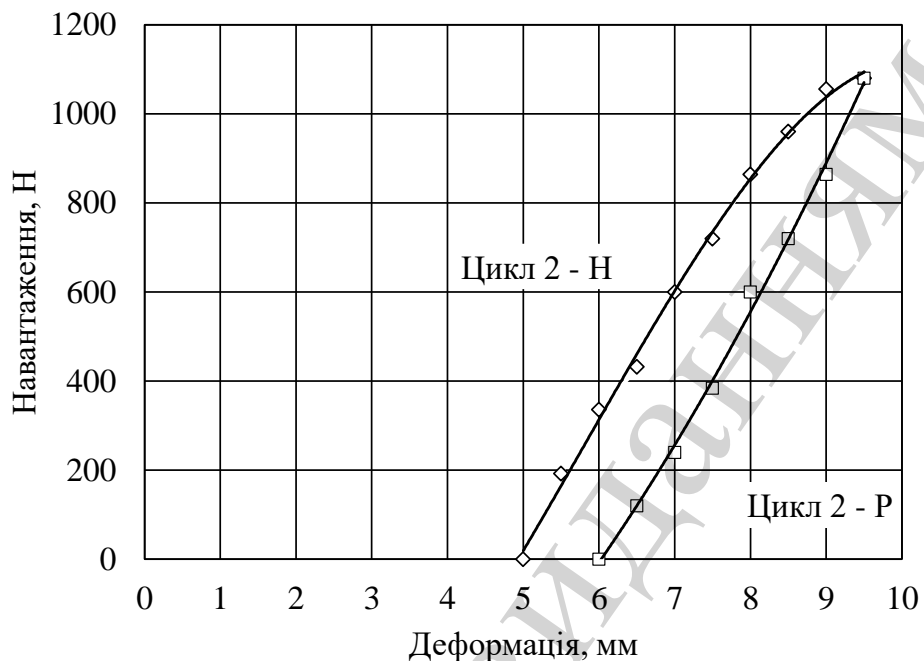


Рис. 5. Графіки трендів циклу 2, Н – навантаження, Р – розвантаження

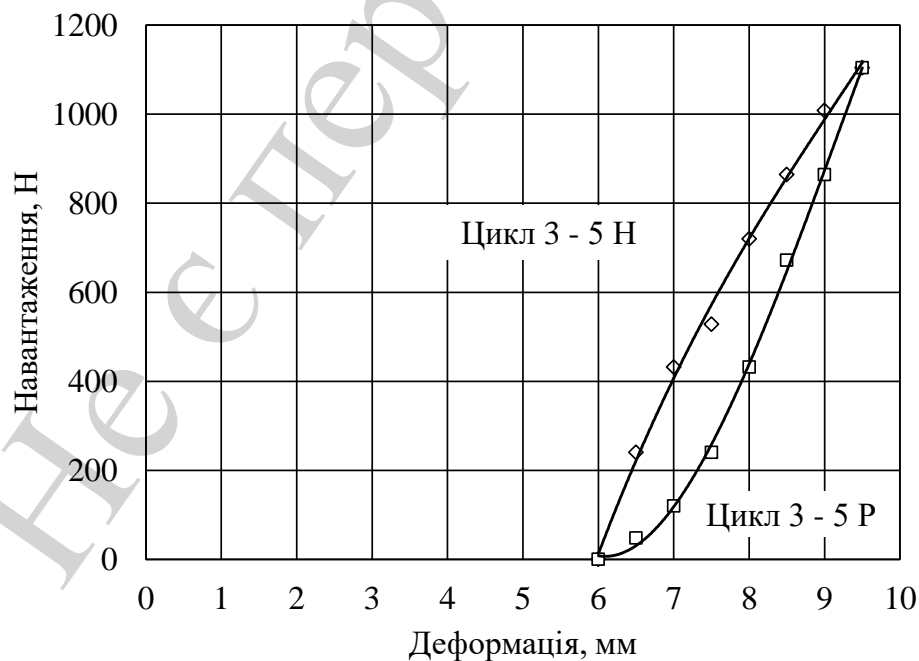


Рис. 6. Графіки трендів циклу 3–5, Н – навантаження Р – розвантаження

Таким чином, площа петлі гістерезису спочатку зменшується, а на 3–5 циклах випробувань – стабілізується.

4. 4. Результати експериментальних досліджень дисипативних властивостей напірних пожежних рукавів в поздовжньому напрямку

Енергія (A_D), що накопичена в зразку і яка відповідає дисипативним властивостям матеріалу фрагменту пожежного рукава, визначається площею петлі гістерезису як різниця робіт, витрачених при навантаженні (A_H) і наступному розвантаженні (A_P) зразка

$$A_D = A_H - A_P = \int_{\Delta \ell_{HP}}^{\Delta \ell_{HK}} F_H(\Delta \ell) d(\Delta \ell) - \int_{\Delta \ell_{PK}}^{\Delta \ell_{PP}} F_P(\Delta \ell) d(\Delta \ell), \quad (2)$$

де $F_H(\ell)$ – рівняння залежності діючої сили від деформації зразка при його навантаженні;

$F_P(\Delta \ell)$ – рівняння залежності діючої сили від деформації зразка при його розвантаженні;

$\Delta \ell_{HP}$ – нижня межа інтегрування, що відповідає початковій точці навантаження;

$\Delta \ell_{HK}$ – верхня межа інтегрування, що відповідає кінцевій точці навантаження;

$\Delta \ell_{PK}$ – нижня межа інтегрування, що відповідає кінцевій точці розвантаження;

$\Delta \ell_{PP}$ – верхня межа інтегрування, що відповідає початковій точці розвантаження.

Якщо прийняти позначення графіків (рис. 4–6), де результати експериментальних досліджень (табл. 2) апроксимовані відповідними поліномами трендів, то рівняння (2) матиме вид:

Для подальших розрахунків дисипативні властивості пожежного рукава доцільно визначити безрозмірним співвідношенням, або коефіцієнтом дисипації:

$$\beta = \frac{A_D}{A_H} \quad (2)$$

Рівняння відповідних трендів отримані після статистичної обробки результатів дослідження засобами Microsoft Excel 2007.

Відповідно, енергія навантаження першого циклу становить $A_{H1} = 5358,15 \cdot 10^{-3}$ Дж, а енергія розвантаження першого циклу становить $A_{P1} = 2080,36 \cdot 10^{-3}$ Дж.

Енергія гістерезису становить $A_{D1} = 3277,79 \cdot 10^{-3}$ Дж. Звідки коефіцієнт дисипації першого циклу становить $\beta_1 = 0,612$.

Аналогічно при другому циклі випробувань (рис. 5).

Енергії навантаження-розвантаження другого циклу становить $A_{H2}=2834,6 \cdot 10^{-3}$ Дж, $A_{P2}=1754,47 \cdot 10^{-3}$ Дж.

Енергія гістерезису $A_{D2}=1080,13 \cdot 10^{-3}$ Дж. Звідки коефіцієнт дисипації другого циклу становить $\beta_2=0,612$.

При третьому-п'ятому циклах випробувань (рис. 6) усереднені експериментальні результати дозволили визначити $A_{H(3-5)}=2079,67 \cdot 10^{-3}$ Дж, $A_{P(3-5)}=1339,47 \cdot 10^{-3}$ Дж, $A_{D(3-5)}=740,2 \cdot 10^{-3}$ Дж, $\beta_{(3-5)}=0,356$.

На рис. 7 наведено діаграми, які графічно відображають показники енергії, яку було витрачено на виконання п'яти послідовних циклів навантаження – розвантаження НПР, а також енергію гістерезису.

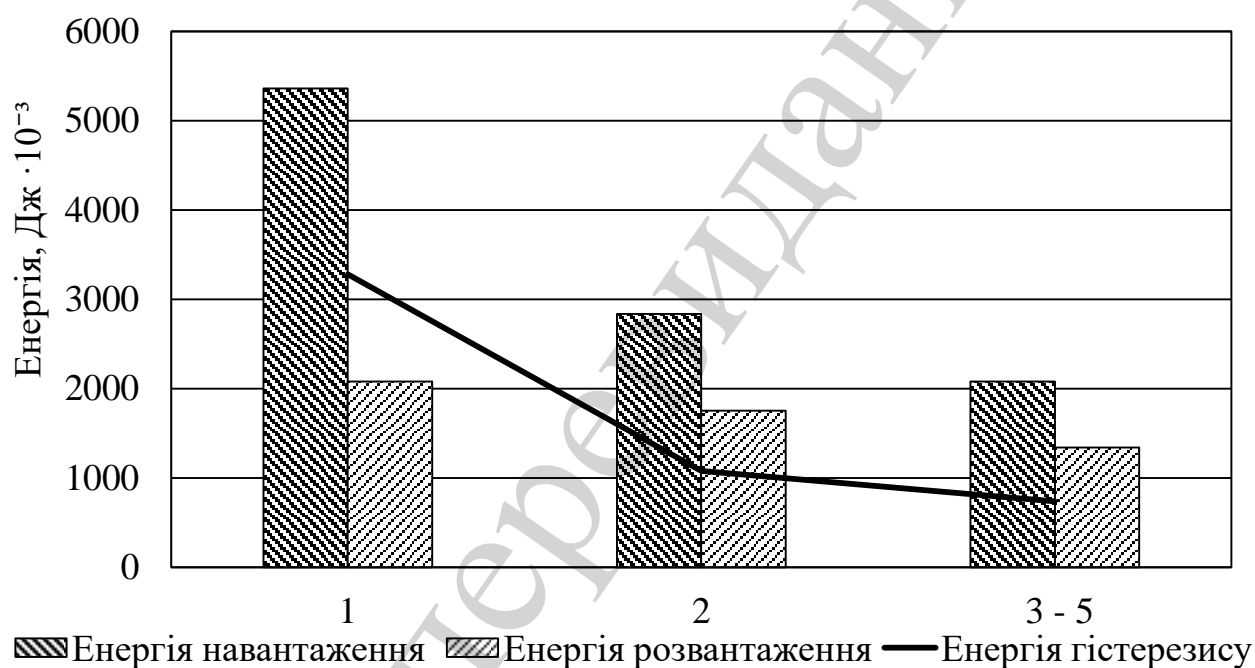


Рис. 7. Параметри циклів навантаження-розвантаження НПР при проведенні експериментів

На рис. 8 наведено залежність зміни дисипативних властивостей матеріалу НПР типу «Т» із внутрішнім діаметром 66 мм при послідовних циклах деформацій від режиму навантаження.

Отримана залежність шляхом використання табличного процесора Microsoft Excel 2007 була апроксимована поліноміальною лінією тренду. Вид лінії тренду обирався на основі розрахованого значення коефіцієнту детермінації, який характеризує ступінь близькості вказаної лінії до вихідних даних. Серед можливих видів ліній тренду розглядалися також експоненціальна, лінійна, логарифмічна та степенева. Відповідно найвище значення, що складає 1, було отримано для степеневі лінії тренду. Одержану лінію тренду описує відповідне рівняння (3).

$$Y_i = 0,0065 \cdot X_i^4 - 0,0952 \cdot X_i^3 + 0,5115 \cdot X_i^2 - 1,1968 \cdot X_i + 1,386, \quad (3)$$

де Y_i – прогнозне значення коефіцієнту дисипації напірного пожежного рукава i -го зразку; X_i – режими навантаження i -го зразку.



Рис. 8. Залежність дисипативних властивостей матеріалу НПР типу «Т» із внутрішнім діаметром 66 мм від режиму навантаження

Таблиця 3

Зведена таблиця результатів розрахунків деяких механічних властивостей пожежного рукава

Характеристика	Позначення	Цикл 1	Цикл 2	Цикли 3–5
Максимальне навантаження	F_i^{\max} , Н	1128	1080	1064
Максимальна деформація фрагменту	Δl_i^{\max} , мм	9,5	4,5	3,5
Залишкова деформація фрагменту	$\Delta l_i^{\text{зал}}$, мм	5,0	1,0	0
Модуль пружності матеріалу	E_i , МПа	60,7	117	148
Коефіцієнт дисипації матеріалу рукава	β_i	0,612	0,381	0,356

Узагальнення проведеного комплексу експериментальних випробувань представлено в табл. 3 в якій зведено усереднені оцінки міцності та пружності для матеріалу НПР типу «Т» із внутрішнім діаметром 66 мм.

5. Обговорення результатів дослідження пружних та дисипативних властивостей напірних пожежних рукавів

Результатом проведення серії експериментального визначення пружних та дисипативних властивостей НПР визначено, що значний початковий гістерезис фрагменту пожежного рукава цикл 1 (рис. 4) при повторних випробуваннях цикл 2 (рис. 5), цикли 3–5 (рис. 6) значно зменшується. Це разом із зменшенням залишкових деформацій та стабілізацією пружних властивостей (табл. 3), наближає поведінку матеріалу рукава в поздовжньому напрямку до пружного.

Надійне і безпечне використання НПР, яке обумовлюється гідравлічними випробуваннями на герметичність за надлишковим тиском під час планових перевірок, визначає лише цілісність та герметичність напірних пожежних рукавів.

Ці випробування спрямовані лише на спрощену оцінку надійності НПР. В їх задачу не входить визначення фізико-механічних властивостей матеріалу НПР. Це обмежує можливості проведення теоретичних досліджень з використанням методу скінчених елементів.

Проведені випробування були обмежені дослідженням тільки одного виду рукавів, при цьому не враховувалась його зношеність.

Ці недоліки можуть бути усунені дослідженням різних типів рукавів з довільним терміном використання та статистичною обробкою результатів.

Подальшим розвитком відповідних досліджень є експериментальний аналіз впливу дії циклічного деформування, а також впливу високих температур на фізико-механічні властивості матеріалу НПР.

Вказані дослідження потребують розробки, як нової методики проведення експериментів, так і виготовлення відповідного обладнання.

6. Висновки

1. Експериментальними дослідженнями з визначення пружних властивостей НПР встановлено, що модуль пружності матеріалу рукава в поздовжньому напрямку стабілізувався на рівні 148 МПа. При цьому величина модуля пружності при майже однаковому діапазоні навантаження (1064÷1128 Н), вельми залежать від «історії» навантаження, тобто, на перших двох, трьох режимах випробувань відповідні жорсткості та модулі пружності збільшувалися і лише потім на наступних – стабілізувалися, при суттєвому зменшенні залишкових деформацій (5÷0 мм).

2. Експериментальними дослідженнями з визначення дисипативних властивостей НПР встановлено, що коефіцієнт дисипації матеріалу рукава стабілізувався на рівні 0,356. При цьому його величина при майже однаковому діапазоні навантаження (1064÷1128 Н), стабільно зменшувалась і лише потім на наступних – стабілізувалися.

Література

1. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2018). Improving the installation for fire extinguishing with finely-dispersed water. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (92)), 38–43. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.127865>

2. Korytchenko, K., Sakun, O., Dubinin, D., Khilko, Y., Slepuzhnikov, E., Nikorchuk, A., Tsebriuk, I. (2018). Experimental investigation of the fire-extinguishing system with a gas-detonation charge for fluid acceleration. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (5 (93)), 47–54. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.134193>
3. Vasiliev, M. I., Movchan, I. O., Koval, O. M. (2014). Diminishing of ecological risk via optimization of fire-extinguishing system projects in timber-yards. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 5, 106–113.
4. Dubinin, D., Korytchenko, K., Lisnyak, A., Hrytsyna, I., Trigub, V. (2017). Numerical simulation of the creation of a fire fighting barrier using an explosion of a combustible charge. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (90)), 11–16. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.114504>
5. Semko, A., Rusanova, O., Kazak, O., Beskrovnaya, M., Vinogradov, S., Gricina, I. (2015). The use of pulsed high-speed liquid jet for putting out gas blow-out. *The International Journal of Multiphysics*, 9 (1), 9–20. doi: <https://doi.org/10.1260/1750-9548.9.1.9>
6. Kovalenko, R., Kalynovskyi, A., Nazarenko, S., Kryvoshei, B., Grinchenko, E., Demydov, Z. et. al. (2019). Development of a method of completing emergency rescue units with emergency vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (3 (100)), 54–62. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.175110>
7. Tiutiunyk, V. V., Ivanets, H. V., Tolkunov, I. A., Stetsyuk, E. I. (2018). System approach for readiness assessment units of civil defense to actions at emergency situations. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 99–105. doi: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-1/7>
8. Абросимов, Ю. Г., Коваль, Е. В. (2006). Гидравлические сопротивления в системах подачи воды на пожаротушение. *Вестник Академии ГПС МЧС России*, 5, 25–28.
9. Хоанг, З. Б. (2009). Экспериментальная установка для исследования гидравлического сопротивления напорных пожарных рукавов. Интернет-журнал “Технологии техносферной безопасности”, 5. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2009-5/08-05-09.ttb.pdf>
10. Моторин, Л. В., Степанов, О. С., Братолобова, Е. В. (2010). Математическая модель для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии. *Изв. вузов. Технология текст. пром-сти*, 8, 103–109.
11. Моторин, Л. В., Степанов, О. С., Братолобова, Е. В. (2011). Упрощенная математическая модель для прочностного расчета напорных пожарных рукавов при гидравлическом воздействии. *Изв. вузов. Технология текст. пром-сти*, 1, 126–133.
12. Дружинин, П. В., Бабушкин, М. Ю. (2013). Диагностирование и прогнозирование остаточного ресурса рукавов высокого давления. *Технико-технологические проблемы сервиса*, 3 (25), 6–12.
13. Fedorko, G., Molnar, V., Dovica, M., Toth, T., Fabianova, J. (2015). Failure analysis of irreversible changes in the construction of the damaged rubber

hoses. *Engineering Failure Analysis*, 58, 31–43. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.08.042>

14. Cho, J. R., Yoon, Y. H., Seo, C. W., Kim, Y. G. (2015). Fatigue life assessment of fabric braided composite rubber hose in complicated large deformation cyclic motion. *Finite Elements in Analysis and Design*, 100, 65–76. doi: <https://doi.org/10.1016/j.finel.2015.03.002>

15. Kwak, S.-B., Choi, N.-S. (2009). Micro-damage formation of a rubber hose assembly for automotive hydraulic brakes under a durability test. *Engineering Failure Analysis*, 16 (4), 1262–1269. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.08.009>

16. Stenmark, N. (2007). Small Leak in Hydraulic Hose Reveals Big Problem. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 7 (3), 183–186. doi: <https://doi.org/10.1007/s11668-007-9033-5>

17. Larin, A. A., Vyazovichenko, Y. A., Barkanov, E., Itskov, M. (2018). Experimental Investigation of Viscoelastic Characteristics of Rubber-Cord Composites Considering the Process of Their Self-Heating. *Strength of Materials*, 50 (6), 841–851. doi: <https://doi.org/10.1007/s11223-019-00030-7>

18. Cardone, D., Gesualdi, G. (2012). Experimental evaluation of the mechanical behavior of elastomeric materials for seismic applications at different air temperatures. *International Journal of Mechanical Sciences*, 64 (1), 127–143. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2012.07.008>

19. Haseeb, A. S. M. A., Jun, T. S., Fazal, M. A., Masjuki, H. H. (2011). Degradation of physical properties of different elastomers upon exposure to palm biodiesel. *Energy*, 36 (3), 1814–1819. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.023>

20. Budinski, M. K. (2013). Failure analysis of a rubber hose in anhydrous ammonia service. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 1 (2), 156–164. doi: <https://doi.org/10.1016/j.csefa.2013.04.009>

21. Мефедова, Ю. А. (2011). Расчет рукавов высокого давления по распределению нагрузки между слоями оплетки. *Вестник Саратовского государственного технического университета*, 3, 97–102.

22. Larin, O. O. (2015). Probabilistic Model of Fatigue Damage Accumulation in Rubberlike Materials. *Strength of Materials*, 47 (6), 849–858. doi: <https://doi.org/10.1007/s11223-015-9722-3>

23. Gu, F., Huang, C., Zhou, J., Li, L. (2009). Mechanical response of steel wire wound reinforced rubber flexible pipe under internal pressure. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 14 (6), 747–756. doi: <https://doi.org/10.1007/s12204-009-0747-2>

24. Cho, J. R., Jee, Y. B., Kim, W. J., Han, S. R., Lee, S. B. (2013). Homogenization of braided fabric composite for reliable large deformation analysis of reinforced rubber hose. *Composites Part B: Engineering*, 53, 112–120. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.045>

25. Cho, J.-R., Yoon, Y.-H. (2016). Large deformation analysis of anisotropic rubber hose along cyclic path by homogenization and path interpolation methods. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30 (2), 789–795. doi: <https://doi.org/10.1007/s12206-016-0134-5>

26. Lee, G.-C., Kim, H.-E., Park, J.-W., Jin, H.-L., Lee, Y.-S., Kim, J.-H. (2011). An experimental study and finite element analysis for finding leakage path in high pressure hose assembly. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12 (3), 537–542. doi: <https://doi.org/10.1007/s12541-011-0067-y>
27. Pavloušková, Z., Klakurková, L., Man, O., Čelko, L., Švejcar, J. (2015). Assessment of the cause of cracking of hydraulic hose clamps. *Engineering Failure Analysis*, 56, 14–19. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.05.014>
28. Noda, N.-A., Yoshimura, S., Kawahara, H., Tuyunaru, S. (2008). FEM Analysis for Sealing Performance of Hydraulic Brake Hose Crimped Portion and Its Life Estimation. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A*, 74 (748), 1538–1543. doi: <https://doi.org/10.1299/kikaia.74.1538>
29. Cho, J. R., Song, J. I., Noh, K. T., Jeon, D. H. (2005). Nonlinear finite element analysis of swaging process for automobile power steering hose. *Journal of Materials Processing Technology*, 170 (1-2), 50–57. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.04.077>
30. Cho, J. R., Song, J. I. (2007). Swaging process of power steering hose: Its finite element analysis considering the stress relaxation. *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188, 497–501. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.113>