

УДК 351.861

В. О. Собина, к.т.н., доцент, нач. каф. (ORCID 0000-0001-6908-8037)
Д. В. Тарадуда, к.т.н., доцент, заст. нач. каф. (ORCID 0000-0001-9167-0058)
М. О. Демент, к.пед.н., доцент, доц. каф. (ORCID 0000-0003-4975-384X)
Національний університет цивільного захисту України, Харків, Україна

УДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ БАЛОНІВ ДЛЯ ДИХАЛЬНИХ АПАРАТІВ НА СТИСНЕНОМУ ПОВІТРІ

Проведено дослідження щодо підвищення надійності, довговічності, а також зниження маси балонів для дихальних апаратів на стисненому повітрі підрозділів рятувальних служб. Розроблено конструкцію композитних балонів із повітрям під високим тиском з покращеними характеристиками, такими як міцність, проникність та забезпечення гігієнічних норм. З метою подальшої практичної реалізації запропонованої конструкції балонів проведено розрахунки, на підставі яких була підтверджена можливість і доцільність виготовлення балонів високого тиску з мінерального волокна в комбінації із в'язким, що відрізняється відносно низькою вартістю і технологічністю при виробництві традиційними методами. Розроблено конструкцію балона високої масової досконалості і вартості менше, ніж аналогічний металопластиковий балон; забезпечено необхідну несучу здатності балонів; визначено проникності повітря через стінку лейнера, вид та кількість виділення органічних сполук з матеріалу лейнерів в процесі зберігання балона, заправленого повітрям. Встановлено, що: балон з лейнером товщиною стінки 2,2 мм втратить герметичність через 45 діб витримки при робочому тиску 30 МПа через неякісно виготовлену прес-форму, стоншення лейнера у цьому місці до 1,3 мм; балон з лейнером товщиною стінки 4 мм при робочому тиску 30 МПа при спостереженні протягом 135 діб втратить у вазі лише 30 г. Дослідження гігієнічних характеристик балонів показало, що після витримки протягом 30 діб при температурі 20 °С при робочому тиску 30 МПа, в повітряному середовищі балонів були виявлені органічні речовини, що відносяться до класу аліфатичних спиртів. Дослідження доводять високу ефективність застосування композитно-полімерних балонів з метою покращення характеристик дихальних апаратів на стисненому повітрі, що підтверджує їх корисність і важливість.

Ключові слова: дихальні апарати на стисненому повітрі, балон, полімерно-композитний матеріал, лейнер

1. Вступ

Забезпечення безпеки рятувальника під час роботи у непридатному для дихання середовищі було і залишається пріоритетним напрямом розвитку та вдосконалення дихальних апаратів на стисненому повітрі.

Аналіз дихальних апаратів, які на сьогодні експлуатуються в підрозділах рятувальних служб України говорить про їх застарілість та високий рівень технічного зношення. Поряд із цим, вивчення широкого спектра моделей автономних ізолюючих дихальних апаратів на стисненому повітрі, представлених на українському ринку, знайомство з етапами їх створення та удосконалення дозволило визначити основні тенденції розвитку та вдосконалення сучасних дихальних апаратів, а саме: підвищення їх надійності, розширення функціональних можливостей, підвищення ергономічності.

Одним з практичних шляхів підвищення надійності дихальних апаратів можна вважати застосування у їх виробництві легких, надійніших, стійкіших до теплових та хімічних впливів матеріалів. Зручність та комфорт рятувальника під час експлуатації є ще одним перспективним напрямком розвитку сучасних дихальних апаратів [1]. Що ж стосується підвищення ергономічності дихальних апаратів, то це питання на пряму пов'язано із зниженням їх загальної ваги.

Таким чином, при відкритій схемі дихання та незмінності існуючої принципової моделі побудови дихальних апаратів на стисненому повітрі, їх подальший розвиток та удосконалення знаходяться зараз у площині конструкторських рішень

щодо вдосконалення окремих вузлів, забезпечення їх багатофункціональності та ергономічності, застосування матеріалів з більш високими експлуатаційними характеристиками та характеристиками міцності.

У зв'язку з вище викладеним, виникає актуальна наукова проблема – моральна та технічна застарілість дихальних апаратів на стисненому повітрі, які знаходяться на озброєнні в підрозділах рятувальних служб.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для вирішення поставленої наукової проблеми необхідно провести аналіз літературних даних щодо дослідження характеристик та розробки конструкцій балонів з повітрям під високим тиском як підрозділів рятувальних служб, так, і об'єктів цивільної інфраструктури.

В роботі [2] представлений інноваційний підхід до визначення залишкової безпеки конструкції композитних балонів засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) берлінської пожежної служби після закінчення призначеного терміну їх служби в 15 років. Зразки балонів проходили випробування гідравлічного циклу навантаження, звичайні випробування на розрив і так звані випробування повільного розриву. Застосовувалося поняття кількісної оцінки деградації міцності. Ця концепція заснована на імовірнісній оцінці середньої міцності і розсіювання кожного зразка балонів. Показано та проаналізовано розподіл міцності балонів ЗІЗ, що випробовувалися. Однак, залишилися не вирішеними питання, пов'язані з характеристиками температурних профілів і накопиченні енергії в конусаменті балонів під час впливу пожежі, а також забезпечення гігієнічних норм при експлуатації композитних балонів з повітрям, що випробовувалися.

Робота [3] присвячена запобіганню ризику розриву балонів для зберігання повітря, що входять до складу системи імпульсного повітря для підводних човнів. У роботі проведено дослідження в'язкості матеріалу балонів перед їх руйнуванням. У роботі зазначається, що до основних причин вибухів відноситься різке зниження надійності металевих балонів під час підвищення надлишкового тиску в результаті впливу теплового випромінювання. Також встановлено, що значення в'язкості руйнування, отримані стандартом ASTM E1820, у порівнянні зі значеннями в'язкості руйнування, отриманими стандартом ISO 12135, є більшими. Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого розробці конструкції саме композитних, а не металевих балонів високого тиску з покращеними характеристиками, основною характеристикою яких є надійність.

У роботі [4] розглядається корисність методу, що заснований на технології обмотки нитки розжарювання в композитних балонах під тиском, його еволюція, різні параметри процесу, різні методи оптимізації, стратегії чисельного аналізу та проблеми розробки композитних балонів. Перевага запропонованого метода будується переважно на економії ваги композитних побутових газових балонів (до 75 %) порівняно з металевими. Але у роботі залишаються не вирішеними проблеми проектування та виробництва, що пов'язані з різними факторами процесу застосування технології намотування нитки розжарювання, а також взагалі не розглядаються питання проникності балонів високого тиску.

Робота [5] присвячена аналізу методів оцінки безпеки балонів, з акцентом на композитні балони для зберігання стисненого повітря. В роботі обговорюються питання безпеки балонів для апаратів на стисненому повітрі з точки зору терміну

служби та деградації матеріалів обладнання, вирішуються проблеми, включаючи якість виробництва, прогнозування деградації з використанням деструктивних випробувань зразків при паралельній експлуатації, періоди повторного тестування та корекцію на недооцінку та завищення безпечного терміну служби. Однак, у роботі не розглядаються питання вибору видів та типів матеріалу ємностей та армуючого матеріалу, що робить відповідні дослідження не повними, адже пропонується лише одна конструкція ємностей та безальтернативний варіант матеріалу корпусу. Крім того залишилися не вирішеними питання, пов'язані з дослідженням проникності та забезпечення гігієнічних норм.

У роботі [6] проаналізовано механізм збільшення тиску у металевому балоні високого тиску і запропоновано метод безперервного нагнітання. Також у роботі було спроектовано, сконструйовано і перевірено теоретично за допомогою методу скінченних елементів балон високого тиску. Робиться висновок, що максимальне напруження балона під тиском зосереджено в нижній частині камери високого тиску, а вихідний отвір в нижній частині лейнера балона високого тиску – його найслабша частина. Проте у роботі розглядається питання розробки конструкції балонів високого тиску лише з огляду надійності їх конструктивних елементів та цілісності загальної конструкції, що в повній мірі не дозволяє говорити про попередження вибухів, чи інших надзвичайних ситуацій, пов'язаних із експлуатацією балонів високого тиску так як у роботі не проводилися дослідження гігієнічних характеристик балонів, проникності їх конструктивних елементів, а також їх масової досконалості.

Таким чином, невирішеною частиною проблеми є недосконалість конструкції та характеристик балонів з повітрям під високим тиском для підрозділів рятувальних служб.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є підвищення надійності, довговічності, а також зниження маси балонів для дихальних апаратів на стисненому повітрі підрозділів ДСНС та інших формувань, які працюють у непридатному для дихання середовищі.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

- розробити конструкцію композитних балонів високого тиску з покращеними характеристиками;
- провести розрахунки конструкції композитних балонів високого тиску з покращеними характеристиками.

4. Матеріали та методи дослідження

Об'єкт дослідження – конструкція композитних балонів високого тиску.

Предмет дослідження – покращення конструкції композитних балонів високого тиску для дихальних апаратів на стисненому повітрі підрозділів ДСНС та інших формувань, які працюють у непридатному для дихання середовищі.

При виконанні роботи застосовувалися методи статистичного, функціонального та системного аналізу для дослідження поєднання взаємопов'язаних елементів конструкції композитних балонів високого тиску, методи теорії ймовірності, теорії надійності, математичної статистики, математичного моделювання, планування експерименту, обробки отриманих даних для узагальнення та побудови структурних схем та моделей.

При проведенні дослідження застосовувалися такі матеріали: в якості мате-

ріалів лейнера – поліетилен-273, Lupolen-5261 та Lupolen-4261; в якості армуючого матеріалу – скловолокно та органоволокно. Обладнання: ваги, компресор, манометр, мультигазоаналізатор-сигналізатор газу, обладнання для вимірювання геометричних параметрів балона та кута спіральної намотки арматури

5. Розробка конструкції композитних балонів високого тиску з покращеними характеристиками

Розробку конструкції композитних балонів високого тиску проведено з точки зору покращення їх характеристик таких, як: міцність, проникність і забезпечення гігієнічних норм.

Укладання армуючого матеріалу здійснювалося за схемою «кокон» з багатозонним укладанням спіральних шарів. Розрахунок значень товщини армуючого матеріалу в багатозонних шарах балона виконувався з урахуванням розповсюдження деформації [7], тобто прораховувалися відносні деформації армуючого матеріалу в напрямку армування кожного шару і за оптимальний проект приймалося рівність деформацій в кожному шарі. При цьому товщина армуючого матеріалу в шарах коректувалася з урахуванням можливості «застильного» укладання кожного шару і виконання вимог безсколкового руйнування балона і нормованого коефіцієнта безпеки [8], характер руйнування балонів показаний на рис. 1.

Масова досконалість визначалася за формулою:

$$\mu = \frac{PV}{M}, \quad (1)$$

де P – руйнівний тиск, кгс/см²; V – об'єм балона, см³; M – маса балона, кг.



Рис. 1. Характер руйнування балонів

Відносні деформації вимірювалися тензометричним методом [8] в осьовому і окружному напрямках на циліндричній частині балона, а за напрямками армування i -х шарів визначалися за виразом (2):

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{oc} \cos^2 \varphi_i + \varepsilon_{ок} \sin^2 \varphi_i, \quad (2)$$

де ε_{oc} , $\varepsilon_{ок}$ – відносні деформації в осьовому і окружному напрямках; φ_i – кут армування i -го шару.

Види досліджених типів поліетилену і армуючого матеріалу наведено в табл. 1.

Табл. 1. Параметри досліджених матеріалів і балонів

Матеріал лейнера	Товщина стінки лейнера, мм	Армуючий матеріал	Маса балона М, кг	Руйнівний тиск (Р), кгс/см ²	Масова досконалість μ , км
Поліетилен – 273	2,2	скловолокно	5,2	790	11,09
Lupolen – 5261	2,2	скловолокно	5,1	800	11,45
Lupolen – 4261	4,0	органоволокно	4,4	≥ 900	$\geq 14,93$

Дослідження гігієнічних характеристик балонів показало наступне. Після витримки протягом 30 діб при температурі 20 °С при робочому тиску 30 МПа, відповідного вимогам джерела, в повітряному середовищі балонів були виявлені органічні речовини, що відносяться до класу аліфатичних спиртів.

Як відомо, ці речовини можуть являтися продуктами деструкції поліетиленів. Результати дослідження представлені в табл. 2.

Табл. 2. Продукти, які виділяються з матеріалу лейнерів

Матеріал лейнера	Вміст мг/м ³			
	ізопропанол	ізобутанол	бутанол	формальдегід
ГДК середньодобова	0,6	0,1	0,1	0,003
ГДК робочої зони	10	10	10	0,5
Lupolen-4261	0,03	0,02	0,10	не знайдений
Lupolen-5261	0,10–0,13	0,10–0,12	не знайдений	не знайдений

Для остаточного підтвердження надійності розроблених балонів проводилася дослідницька робота на балонах з внутрішнім об'ємом $V=7,3$ літра з використанням лейнерів з поліетиленової групи, призначених для повітряно-дихальних апаратів.

Проведені дослідження дозволили отримати конструкцію балона високої масової досконалісті і вартості менше, ніж аналогічний металопластиковий балон, а також:

- забезпечити необхідну несучу здатність балонів;
- визначити проникність повітря через стінку лейнера;
- дослідити виділення органічних сполук з матеріалу лейнерів в процесі зберігання балона, заправленого повітрям.

6. Проведення розрахунків конструкції композитних балонів високого тиску з покращеними характеристиками

З метою подальшої верифікації запропонованої конструкції композитних балонів високого тиску з покращеними характеристиками, такими як міцність, проникність та забезпечення гігієнічних норм проведено наступні розрахунки.

Застосуємо безмоментну теорію до складеної замкнутої оболонки, утвореної з циліндра і двох днищ [10] (рис. 2). При цьому доцільно розглянути окремо циліндр і окремо днища, а потім з'ясувати можливість з'єднання цих оболонок, по можливості, без порушення положень безмоментної теорії.

Вважається заданим:

- розрахункове руйнівний тиск $p=40$ МПа;
- внутрішній об'єм корпусу $V=0,01$ м³;
- радіус циліндричної частини $R=0,14$ м;
- радіус фланця $r_0=0,028$ м;

– межа міцності однонаправленого композиційного матеріалу (ОКМ), уздовж напрямку армування (матеріал – поліпропілен) $\bar{\sigma}_1 = 2350$ МПа.

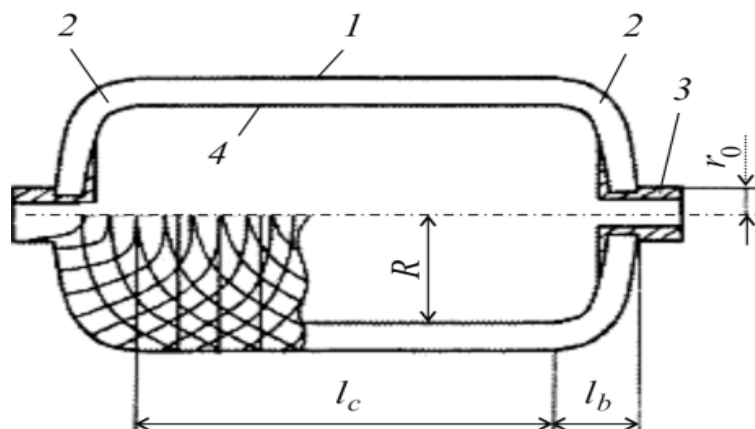


Рис. 2. Типова схема композитного балона високого тиску: 1 – циліндрична частина; 2 – днище; 3 – закладні елементи; 4 – полімерний лейнер

Потрібно визначити:

- кут спіральної намотки на циліндричній частині φ_0 ;
- товщину спірального шару h_φ ;
- товщину кільцевої підмотки на циліндричній частині балона h_{90} ;
- профіль днища $y(r)$;
- довжину циліндричної частини і виліт днища $l_{ц}$, $l_{дн}$.

Необхідно виконати розрахунок циліндричної частини балона і визначити φ_0 , h_φ і h_{90} . Кут спіральної намотки φ_0 вибирається виходячи з умови, що при намотуванні днища по геодезичним лініям укладається стрічка повинна стосуватися колу r_0 закладного фланця (рис. 2). Одною з важливих властивостей геодезичної лінії є те, що вона з'єднує дві точки на поверхні обертання за коротшу відстань, гнучка нитка, покладена на абсолютно гладку поверхню оболонки обертання, не буде зісковзувати з поверхні. Згідно з теоремою Клеро, для геодезичної лінії повинна виконуватися наступна умова:

$$r \cdot \sin \varphi = \text{const} , \quad (3)$$

де r – радіус паралелі; φ – кут укладання, відлічуваний від меридіана (рис. 3).

Кут намотування спірального шару на циліндричній частині балона будемо визначати за геометричними параметрами днища, яке повинно бути виконано за умовами геодезичного рівноважного намотування:

$$\varphi_0 = \arcsin \frac{0,028}{0,14} = 0,2014 \text{ рад.} \quad (4)$$

Використовуючи одновимірну (іноді називають нитяною) модель шару ОКМ, в якому враховують тільки напруги, що діють уздовж напрямку армування $\bar{\sigma}_1$, обчислимо товщину спірального шару h_φ і шару кільцевої підмотки h_{90} на циліндричній частині балона за такими формулами (5):

$$h_\varphi = \frac{hR}{2\bar{\sigma}_1(1-r_0^{-2})} = \frac{4 \cdot 10^7 \cdot 0,14}{2 \cdot 2,35 \cdot 10^9 (1-0,2^2)} = 1,24^{-3} \text{ м.} \quad (5)$$

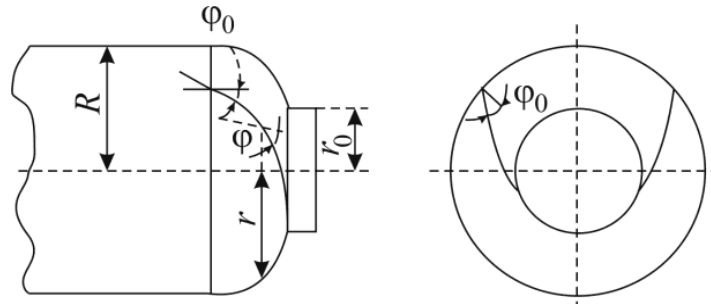


Рис. 3. Схема визначення кута спіральної намотки

При розгляді послідовності виконання проектного розрахунку для визначення основних параметрів днища балона необхідно визначити форму меридіана днища. Диференціальне рівняння основної частини меридіана, який не доходить до фланця $b < r < R$, де $b = r_0 \sqrt{3/4}$, згідно з формулою (6) має вигляд:

$$y' = - \frac{r^3}{\sqrt{\frac{R^4}{\cos^2 \varphi_0} (r^2 - R^2 \sin^2 \varphi_0) - r^6}}, \quad (6)$$

де y – виліт днища; r – радіальна координата.

Для диференціального рівняння ставиться крайова умова $y(r=R)=0$, тобто при сходженні з циліндра виліт днища дорівнює 0. Для «відсіченої» частини днища (рис. 4) складаються рівняння рівноваги (7), з яких виводиться рівняння для частини меридіана в зоні полиці фланця ($r_0 < r < b$):

$$\begin{cases} 2\pi r N_1 \cdot \sin \theta = p_\varphi \pi (r^2 - r_0^2), \\ \frac{N_1}{R_1} + \frac{N_2}{R_2} = p_\varphi, \\ \frac{N_2}{N_1} = \operatorname{tg}^2 \varphi = \frac{r_0^2}{r^2 - r_0^2}, \end{cases} \quad (7)$$

де N_1, N_2 – меридіональні погонні сили в днище; R_1 – радіус кривизни меридіана в перерізі; R_2 – другий радіус кривизни оболонки обертання; p_φ – постійний тиск, який визначається за формулою (8):

$$p_\varphi = p \frac{b_2}{b^2 - r_0^2}. \quad (8)$$

Проведено розрахунок балона, аналогічного балону високого тиску з ПВХ-лейнером і базальтопластиковою силовою оболонкою з форми і установленим характеристикам, межа міцності якого уздовж напрямку армування $\bar{\sigma}_1 = 1750$ МПа (матеріал – склопластик). Розрахунок склопластикової силової оболонки виконується аналогічно розрахунку базальтопластикової силової оболонки. Нижче представлена таблиця розрахунків балона високого тиску базальтопластикового і склопластикового волокна (табл. 3).

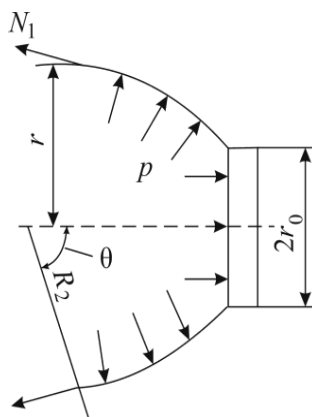


Рис. 4. До рівняння рівноваги «відсіченої» частини днища

Табл. 3. Розрахункові параметри оболонок

Знайдені параметри	Базальтопластик	Склопластик
1	2	3
φ_0	0,2014	0,2014
1	2	3
$h\varphi$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$
h_{90}	$2,33 \cdot 10^{-3}$	$3,13 \cdot 10^{-3}$
$V_{\text{дн}}$	0,0035	0,0035
$l_{\text{дн}}$	0,05	0,05

На підставі отриманих розрахунків була підтверджена можливість і доцільність виготовлення балонів високого тиску з мінерального волокна в комбінації зі зв'язуючим, що відрізняється відносно низькою вартістю і технологічністю при виробництві традиційними методами. Використання полівінілхлоридного матеріалу в якості лейнера є новим технічним рішенням.

7. Обговорення результатів розробки конструкції балонів з покращеними характеристиками

В результаті проведеного дослідження було досягнуто поставленої мети, а саме: підвищено надійність, довговічність, а також знижено масу балонів для дихальних апаратів на стисненому повітрі підрозділів ДСНС та інших формувань, які працюють у непридатному для дихання середовищі. Досягнення поставленої мети доведено наступними факторами: підвищення надійності і довговічності балонів для апаратів на стисненому повітрі було досягнуто шляхом укладання армуючого матеріалу за схемою «кокон» з багатозонним укладанням спіральних шарів, а розрахунок значень товщини армуючого матеріалу в багатозонних шарах балона виконувався з урахуванням розповсюдження деформації, тобто прораховувалися відносні деформації армуючого матеріалу в напрямку армування кожного шару і за оптимальний проект приймалося рівність деформацій в кожному шарі; знижено масу балонів для дихальних апаратів на стисненому повітрі шляхом застосування композитних балонів з лейнером з органічних матеріалів, основою яких є синтетичні або природні високомолекулярні сполуки (полімери), аморфний матеріал яких не схильний до втоми в діапазоні відносних деформацій, що виникають при експлуатації балонів, крім того, лейнер з органічного матеріалу істотно знижує загальну масу балону і вартість його виготовлення в порівнянні з металевим.

Як видно з табл. 1, міцність балонів реалізується при задовільній їх масі.

Випробування запроваджених балонів на газопроникність показало:

– балон з лейнером з Lupolen-5261 товщиною стінки 2,2 мм втратив герметичність через 45 діб витримки при робочому тиску (30 МПа). Сталася розгерметизація по сліду від гнізда пресформи (не якісно виготовлена прес-форма, стоншення лейнера у цьому місці до 1,3 мм).

– балон з лейнером з Lupolen-4261 товщиною стінки 4 мм, в запровадженому на робочий тиск (30 МПа) при спостереженні протягом 135 діб втратив у вазі 30 г.

Як видно з табл. 2, концентрація органічних речовин, що виділилися з лейнера, виготовленого з Lupolen-4261, не перевищує ГДК середньодобову ГДК робочої зони. Витримка протягом 4-х годин при температурі 60 °С запровадженого балону з лейнером з Lupolen 4261 призвело до збільшення виділення приблизно в два рази ізопропанолу, ізобутанолу, бутанолу, але при цьому їх зміст залишився нижче ГДК робочої зони. Слід зазначити, що при випробуванні лейнера з Lupolen-5261 додатково виявлено виділення 4-метил-2пентанол в кількості 0,15...0,20 мг/м³, що перевищує середньодобову ГДК у 2–3 рази.

Проведені дослідження дозволили отримати конструкцію балона високої масової досконалості і вартості менше, ніж аналогічний металопластиковий балон, а також: забезпечити необхідну несучу здатність балонів; визначити проникність повітря через стінку лейнера; дослідити виділення органічних сполук з матеріалу лейнерів в процесі зберігання балона, запровадженого повітрям. При розрахунку балона високого тиску був обраний лейнер з полімеру полівінілхлориду. Основний матеріал, що використовується при виробництві балонів, має багат шарову структуру: основний шар з синтетичної тканини (поліестер) з двостороннім покриттям з шарів поліхлорвінілу, пов'язаних між собою спеціальним адгезивним складом. Лицьова сторона має додатковий захисний шар з поліуретану, що підвищує стійкість до абразивного стирання. Матеріал стійкий до впливу ультрафіолетового випромінювання, солоної води, пального і мастил. Шви лейнера виконуються методом з'єднання «в стик», з проклеюючою з двох сторін стрічками з основного матеріалу. Для склейки застосовується клей на поліуретановій основі, який, вступаючи в хімічний контакт з матеріалом склеюваних поверхонь, дає ефект «холодної зварки». Лейнер виготовляється в такому розмірному співвідношенні, щоб в процесі заповнення повітрям він щільно зайняв своє місце по контуру силової оболонки. При подачі тиску, який створює напругу в стінці лейнера по осьовому напрямку, рівному межі плинності матеріалу, не виникає руйнівних сил в стінці лейнера, а при більшому тиску основне навантаження бере на себе силова оболонка.

Як недолік даного дослідження можна відзначити наступне: у процесі просочення базальтового наповнювача сполукою спостерігається дещо більший його обсяг у зв'язку з гідрофільністю поверхні волокон, також слід звернути увагу на неоднорідність механічної міцності у зв'язку з розлохмочуванням відділових філаментів. Ця проблема може бути вирішена в перспективі шляхом застосуванням поверхнево-активних речовин в якості активатора для зміни енергії Гіббса.

Таким чином, розробка композитних балонів високого тиску до 30 МПа з використанням лейнера з Lupolen-4261 товщиною 4 мм є досить перспективною з точки зору всіх поставлених у дослідженні напрямків: міцності, проникності і забезпечення гігієнічних норм.

Подальші дослідження планується присвятити випробуванням натурних зразків балонів для дихальних апаратів на стисненому повітрі підрозділів ДСНС.

8. Висновки

1. Розроблено конструкцію балона високої масової досконалості і вартості менше, ніж аналогічний металопластиковий балон, а також: забезпечити необхідну несучу здатність балонів; визначити проникність повітря через стінку лейнера; дослідити виділення органічних сполук з матеріалу лейнерів в процесі зберігання балона, заправленого повітрям. Так встановлено, що балон з лейнером товщиною стінки 2,2 мм втратив герметичність через 45 діб витримки при робочому тиску 30 МПа через неякісно виготовлену прес-форму, стоншення лейнера у цьому місці до 1,3 мм; балон з лейнером товщиною стінки 4 мм при робочому тиску 30 МПа при спостереженні протягом 135 діб втратив у вазі лише 30 г. Дослідження гігієнічних характеристик балонів показало, що після витримки протягом 30 діб при температурі 20 °С при робочому тиску 30 МПа, в повітряному середовищі балонів були виявлені органічні речовини, що відносяться до класу аліфатичних спиртів, а саме: при застосуванні Lupolen-4261 в діапазоні 0,03 – 0,1 мг/м³, а при застосуванні Lupolen-5261 – 0,1 – 0,13 мг/м³ при середньодобовій ГДК 0,1 – 0,6 мг/м³.

2. Запропоновано конструкцію композитних балонів високого тиску з покращеними характеристиками, такими як міцність, проникність та забезпечення гігієнічних норм, проведено розрахунки, на підставі яких була підтверджена можливість і доцільність виготовлення балонів високого тиску з мінерального волокна в комбінації зі зв'язуючим, що відрізняється відносно низькою вартістю і технологічністю при виробництві традиційними методами. Використання полівінілхлоридного матеріалу в якості лейнера є новим технічним рішенням. Тиск повітря збільшується при збільшенні температури газової суміші. У разі значного нагрівання, що може бути викликане пожежею, або вибухом, відбувається різке збільшення внутрішнього тиску, в результаті чого стінки корпусу не витримують і відбувається їх розрив. Композитно-полімерні балони не вибухають з двох причин. По-перше, у процесі сильного нагріву перегорає плавка вставка, розташована на вентилі, в результаті чого відкривається вихідний клапан і повітря скидається в навколишнє середовище. По-друге, скловолоконний корпус під впливом високої температури плавиться, і повітря починає виходити через отвори, що утворилися. Що ще раз доводить високу ефективність застосування композитно-полімерних балонів з метою попередження надзвичайних ситуацій на об'єктах, де вони експлуатуються.

Література

1. Єлізаров О. В. Тенденції удосконалення ізолюючих дихальних апаратів на стисненому повітрі. Х міжн. наук.-практ. конф. «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій». 2019. Черкаси, Україна 11–12 квітня 2019. http://edu-mns.org.ua/img/news/120/zbirnik_11-12.04.2019.pdf#page=27
2. Mair G. W., Scherer F., Scholz I., Schönfelder T. The Residual Strength of Breathing Air Composite Cylinders Towards the End of Their Service Life: A First Assessment of a Real-Life Sample. ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference. 2014. Anaheim, California, USA 20–24 July 2014. <https://doi.org/10.1115/PVP2014-28168>
3. Zhi-Bo H., Pan L., Da-Sheng W., Yue-Bing L. Fracture toughness evaluation of 37CrNi3MoVE steel used for high-pressure air storage cylinder. Materials Express. 2022. Vol. 12. № 1. P. 123–132. <https://doi.org/10.1166/mex.2022.2133>
4. Azeem M., Haji Ya H., Azad Alam M., Kumar M., Stabla P., Smolnicki M.,

Gemi L., Khan R., Ahmed T., Ma Q., Md Rehan Sadique, Akmar Mokhtar A., Mazli Mustaphaa. Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review. *Journal of Energy Storage*. May 2022. Vol. 49. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103468>

5. Mair G. W. Safety Assessment of Composite Cylinders for Gas Storage by Statistical Methods. Potential for Design Optimisation Beyond Limits of Current Regulations and Standards. Book. Springer 2017. P. 304. ISBN: 978-3-319-49710-5

6. Xiaoxiao Niu, Guangfa Hao, Chengliang Zhang, Lei Li. Design and Experimental Verification of Pressurized Cylinders in Hydraulic Rubber Hose Pressure Washers. *International journal on the science and technology «Actuators»*. 2021. Vol. 10. 139 p. <https://doi.org/10.3390/act10070139>

7. Ivanovskiy V. Designing of metal-base composite vessels of high pressure on the set service life. Teka Commission of motorization and power industry in agriculture Lublin University of Technology, Polish Academy of Sciences Branch in Lublin. Volodimir Dal East-Ukrainian National University of Lugansk. Lublin 2012. P. 211–217.

8. International standard ISO/TR 13086-1:2011. Gas cylinders – Guidance for design of composite cylinders. Part 1: Stress rupture of fibres and burst ratios related to test pressure. 2011. 45 p. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:13086:-1:ed-1:v1:en>.

9. Pilarczyk M., Węglowski B., Nord L. O. Experimental validation of an algorithm for determining transient stresses within pressure components by means of the tensometric method. *International Conference on Applied Energy*. 2019. Sweden 12–15 Aug. 2019.

10. Evkin A. Yu. Composite spherical shells at large deflections. Asymptotic analysis and applications. *Composite Structures*. 2020. Vol. 233. 111577. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111577>

V. Sobyna, PhD, Associate Professor, Head of Department

D. Taraduda, PhD, Associate Professor, Deputy Head of the Department

M. Dement, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department

National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

IMPROVEMENT CONSTRUCTIONS CYLINDERS OF BREATHING APPARATUSES ON COMPRESSED AIR

A study was conducted to increase the reliability, durability, and weight reduction of cylinders for compressed air breathing apparatus of rescue service units. The design of composite cylinders with high-pressure air with improved characteristics, such as strength, permeability and ensuring hygienic standards, was developed, and with the aim of further verification of the proposed design, calculations were carried out, on the basis of which the possibility and feasibility of manufacturing high-pressure cylinders from mineral fiber in combination was confirmed with a binder, which is characterized by a relatively low cost and manufacturability when produced by traditional methods. The research was carried out with the aim of: developing a balloon design of high mass perfection and cost less than a similar metal-plastic balloon; ensuring the necessary carrying capacity of cylinders; determination of air permeability through the liner wall; determination of the type and amount of organic compounds released from the material of the liners during the storage of the cylinder filled with air. As a result of the research, it was established that: a cylinder with a liner with a wall thickness of 2.2 mm will lose its tightness after 45 days of exposure at a working pressure of 30 MPa due to a poorly made press mold, thinning of the liner in this place to 1.3 mm; a cylinder with a liner with a wall thickness of 4 mm at an operating pressure of 30 MPa, when observed for 135 days, will lose only 30 g in weight. A study of the hygienic characteristics of the cylinders showed that after exposure for 30 days at a temperature of 20 °C at an operating pressure of 30 MPa, in the air environment of the cylinders organic substances

belonging to the class of aliphatic alcohols were found. Research proves the high efficiency of the use of composite-polymer cylinders for the purpose of preventing emergency situations at the facilities where they are operated, which confirms their usefulness and importance.

Keywords: breathing apparatuses on compressed air, cylinder, polymer-composite material, liner

References

1. Ielizarov, O. V. (2019). Tendentsii udoskonalennia izoliuiuchykh dykhalnykh aparativ na stysnenomu povitri. X Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Teoriia i praktyka hasinnia pozhezh ta likvidatsii nadzvychainykh sytuatsii». http://edu-mns.org.ua/img/news/120/zbirnik_11-12.04.2019.pdf#page=27
2. Mair, G. W., Scherer, F., Scholz, I., Schönfelder, T. (2014). The Residual Strength of Breathing Air Composite Cylinders Towards the End of Their Service Life: A First Assessment of a Real-Life Sample. ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference. (Paper №: PVP2014-28168, V06AT06A023). <https://doi.org/10.1115/PVP2014-28168>
3. Zhi-Bo, H., Pan, L., Da-Sheng, W., Yue-Bing, L. (2022). Fracture toughness evaluation of 37CrNi3MoVE steel used for high-pressure air storage cylinder. *Materials Express*, 12, 1, 123–132. <https://doi.org/10.1166/mex.2022.2133>
4. Azeem, M., Haji, Ya H., Azad Alam, M., Kumar, M., Stabla, P., Smolnicki, M., Gemi, L., Khan, R., Ahmed, T., Ma, Q., Md Rehan, Sadique, Akmar Mokhtar, A., Mazli, Mustaphaa. (2022). Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review. *Journal of Energy Storage*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103468>
5. Mair, G. W. (2017). Safety Assessment of Composite Cylinders for Gas Storage by Statistical Methods. Potential for Design Optimisation Beyond Limits of Current Regulations and Standards. Book. Springer, 304. ISBN: 978-3-319-49710-5
6. Xiaoxiao, Niu, Guangfa, Hao, Chengliang, Zhang, Lei, Li. (2021). Design and Experimental Verification of Pressurized Cylinders in Hydraulic Rubber Hose Pressure Washers. *International journal on the science and technology «Actuators»*, 10, 139. <https://doi.org/10.3390/act10070139>
7. Ivanovskiy, V. (2012). Designing of metal-base composite vessels of high pressure on the set service life. *Teka Commission of motorization and power industry in agriculture Lublin University of Technology*, 1, 211–217.
8. International Organization for Standardization. (2011). International standard ISO/TR 13086-1:2011. Gas cylinders – Guidance for design of composite cylinders. Part 1: Stress rupture of fibres and burst ratios related to test pressure. Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:13086:-1:ed-1:v1:en>
9. Pilarczyk, M., Węglowski, B., Nord, L. O. (2019). Experimental validation of an algorithm for determining transient stresses within pressure components by means of the tensometric method. *International Conference on Applied Energy*. (Paper ID: 0665).
10. Evkin, A. Yu. (2020). Composite spherical shells at large deflections. Asymptotic analysis and applications. *Composite Structures*, 233, 111577. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111577>

Надійшла до редколегії: 17.10.2022

Прийнята до друку: 15.11.2022