

УДК 629.7.028.24+620.22:678.4

А. М. Удод, О. І. Скоков, В. В. Воловщикова, С. В. Шепель,  
М. В. Літвінова, К. А. Стешенко

## ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ АГРЕГАТІВ ПАЛИВНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ СПЕКОТНОГО КЛІМАТУ

Розглянуто проблему збільшення довговічності гумотехнічних виробів (ГТВ), безпосередньо пов'язану з підвищенням опору гуми різним видам термічного старіння. Термостійкість під час стискання є найбільш важлива для гум, які використовують для ущільнювачів різних типів: кілець, манжет, армованих манжет, прокладок для авіації та ракетної техніки. Релаксація напруги та нагромадження відносної залишкової деформації гум, що зумовлені саме кінетичною перебудовою хімічних зв'язків, надзвичайно чутлива до впливу високих температур. Основна причина дефектів – це втрата пружно-еластичних властивостей ущільнювачів у результаті прискореного теплового старіння нітрильної групи в умовах довгострокової дії підвищених температур у спекотному кліматі. Наведено результати прискорених кліматичних випробувань зразків ГТВ, а також результати ресурсно-кліматичних випробувань агрегатів на строк, що імітує 20-річний строк експлуатації, основні види дефектів, які призводять до втрати працездатності ГТВ: велика (до 100 %) залишкова деформація перетинів, розтріскування, втрата еластичності. Гарантійний термін експлуатації агрегатів паливних систем, укомплектованих ГТВ з нітрильної гуми ИРП-1078, не перевищує 12 років. Зміна існуючих гум на гуми, створені на основі більш тепломісних каучуків, є найбільш перспективним шляхом підвищення працездатності ГТВ за високих температур. Нова гума Д2301 створена на основі фторсилоксанового каучуку. Вона забезпечує високу термічну стійкість та, особливо, спроможність довготривало зберігати високі експлуатаційні властивості при одночасному впливі агресивних середовищ і високих температур. Результати ресурсно-кліматичних випробувань агрегатів паливної системи, укомплектовані ГТВ з гуми Д2301, дають підстави збільшити призначений строк експлуатації зазначених агрегатів з 12 до 16 років. Рекомендовано ввести гуму Д2301 до чинної нормативної документації та продовжити дослідження з метою розширення номенклатури ГТВ з гуми Д2301 з метою надійності герметизації вузлів протягом терміну експлуатації 16 років і більше.

**Ключові слова:** герметичність агрегатів, фторсилоксановий каучук, гума, температура спекотного клімату, фізико-механічні показники гуми, ресурсно-кліматичні випробування, пружно-еластичні властивості, гарантійний термін експлуатації.

The article dwells on the problem of enhancement of durability for the mechanical rubber articles, which is directly related to the enhance of rubber resistance to various types of heat aging. Heat resistance during compression is most important for rubbers used for seals of various types: rings, collars, armored collars, gaskets for aviation and rocket technology hardware. Stress relaxation and the accumulation of relative residual deformation of rubbers, caused by the kinetic rearrangement of chemical bonds, are extremely sensitive to the influence of high temperatures. The main cause of the defects is the loss of elastic properties of the seals because of the accelerated heat aging of the nitrile group under conditions of long-term exposure to elevated temperatures in conditions of hot climate. The results of accelerated climatic testing of specimens of mechanical rubber articles, as well as the results of climatic endurance testing of the units for the period simulating 20-year service life are specified, and the main types of defects which result in the loss of performance properties of the mechanical rubber articles are as follows: great (up to 100 %) residual deformation of intersections, cracking, loss of elasticity. The warranty life of fuel system units, made of ИРП-1078 nitrile rubber, does not exceed 12 years. Replacing the existing rubbers with rubbers created on the basis of more heat-bearing rubbers is the most promising way to improve the performance properties of the mechanical rubber articles under the high temperatures. The new D2301 rubber is based on fluorosiloxane rubber. It provides high thermal stability and, especially, the ability to maintain high performance properties for a long time under the simultaneous impact of hostile environment and high temperatures. The results of climatic endurance testing of fuel system units, equipped with rubber articles made of D2301 rubber, fully justify the increase of the specified service life of the specified units from 12 to 16 years. It is recommended to introduce D2301 rubber into the effective normative documentation and continue studies in order to extend the nomenclature of mechanical rubber articles made of D2301 rubber to provide the reliable sealing of units during the service life of 16 years or longer.

**Key words:** leaktightness of articles, fluorosiloxane rubber, rubber, temperature of the hot climate, physical-mechanical properties of the rubber, climatic endurance tests, elastic properties, warranty life.

Проблема збільшення довговічності гумо-технічних виробів (ГТВ), які використовують у вузлах і агрегатах авіаційної та космічної техніки, безпосередньо пов'язана з підвищенням опору гуми, як конструкційного матеріалу, до різноманітних видів старіння. Атмосферне, теплове, світлове й інші види старіння являють собою комплекс фізичних і хімічних перетворень гуми, що відбуваються під впливом атмосфери, озону та кисню, сонячної радіації та тепла. Гуми в ході старіння поступово втрачають свої еластичні властивості незалежно від того, знаходяться вони в напруженому стані чи ні. Причому такі зміни властивостей гуми є необоротними.

Термостійкість – здатність гум зберігати свої властивості під впливом високої температури, тобто здійснювати опір термічному старінню, в процесі якого відбувається зміна. Термостійкість під час стискання є найбільш важливою для гум, які використовують для ущільнювачів різних типів у вузлах авіаційної та ракетної техніки: кілець круглого перетину, манжет, напилків, армованих манжет, прокладок найрізноманітніших конфігурацій і розмірів.

Втрата еластичних властивостей гум характеризується тим, що фізико-механічні показники, такі як твердість, умовна міцність під час розтягування, відносне видовження, змінюються незначно. У той же час, релаксація напруг і нагромадження відносної залишкової деформації, що зумовлені саме кінетичною перебудовою хімічних зв'язків, надзвичайно чутливі до впливу високих температур.

Опір гум термічному старінню під час стискання в основному залежить від типу

каучуку, структури та щільності просторової сітки вулканізату, умов експлуатації.

Таким чином, заміна існуючих гум на гуми, створені на основі більш теплостійких каучуків, є найбільш перспективним шляхом підвищення працездатності ГТВ за високих температур. Інші шляхи, як то введення додаткового охолодження проблемних місць конструкції агрегатів, зменшення температур робочих середовищ, є досить складними, вимагають значного удосконалення конструкції агрегатів і додаткового обсягу випробувань.

Для створення гум з новими підвищеними властивостями перспективним є використання відповідних термостійких каучуків, а також нових хімічних домішок поліфункціональної дії.

Статистичний аналіз випадків втрати герметичності паливних агрегатів авіаційної техніки, які експлуатували в країнах зі спекотним кліматом, показує, що найчастіше відмови відбуваються у фланцевих з'єднаннях корпусних частин, а також на ущільненнях зовнішніх виходів штуцерів і регулювальних гвинтів. Основна причина дефектів – втрата пружно-еластичних властивостей ущільнювачів (кілець і прокладок), виготовлених із нитрильної гуми ИРП-1078 (умови експлуатації ГТВ з неї наведено в табл. 1), у результаті прискореного теплового старіння нитрильної гуми в умовах довготривалого впливу підвищених температур у спекотному кліматі. А саме у результаті швидкого зростання відносної залишкової деформації і, як наслідок, зниження контактних навантажень в місцях ущільнення та втрати герметичності паливної системи.

Таблиця 1

Група гумової суміші	Марка гумової суміші	Умови роботи ГТВ		Основне призначення (види ГТВ)
		Середовище	Температури, °С	
6	ИРП-1078	Повітря	Від мінус 40 до плюс 150	Формові гумові, гумометалеві деталі нерухомих з'єднань, що працюють за статичної та динамічної деформації
		Мастила: АМГ-10, МК-8, МК-8П	Від мінус 50 до плюс 150	
		Палива: ТС-1, Т-6, Т-8В, РТ	Від мінус 50 до плюс 150	
		Масило МГЕ-10А	Від мінус 50 до плюс 100	

Слід зазначити, що серійні ущільнювальні кільця, виготовлені із серійної нітрильної гуми ИРП-1078 і встановлені в паливних агрегатах, мали залишкову деформацію перетинів майже до 100 %, що призвело до відтворення перетином кілець форми перетину канавок, у яких їх встановлюють. При цьому гума ИРП-1078 на 50 % втратила пружно-еластичні властивості, а під час демонтажу (розтягування) кільця були помічені часті випадки їх розривання та розтріскування.

Крім того, у зовнішній зоні защемлення мембран була помітна значна залишкова деформація (сплюснення) полотна, що є перешкодою для повторного монтажу мембран в агрегат, бо сплюснутість не забезпечить потрібного натягу в ущільненні без перетиску полотна. Останній є недопустимим, адже може призвести до розшарування та руйнування ниток бавовняної тканини – основи полотна.

Наукова складність вирішення поставленого завдання полягає в такому. З одного боку, зміна рецептури гуми викликає зміну ряду її фізично-механічних показників, які

повинні залишатися в межах, визначених нормативною документацією. З другого боку, нова гума повинна забезпечити працездатність ГТВ з неї в широкій номенклатурі палив і мастил, а також за впливу високої температури, кисню, повітря й інших експлуатаційних факторів (тиску, вібрації).

Впливаючи одна на одну, ці дві групи факторів створюють комплекс параметрів, яким повинна відповідати нова гума, забезпечуючи надійну герметизацію агрегатів у ході експлуатації паливної системи авіаційної та ракетної техніки.

З метою усунення зазначених негативних факторів за участю ТОВ «УНДКТІ «ДІНТЕМ» та ДП «ХМЗ «ФЕД» було проведено науково-дослідну та дослідно-конструкторську роботу з визначення можливості підвищення заданого терміну експлуатації агрегатів до першого ремонту з 12 до 20 років в умовах спекотного клімату.

З урахуванням наведеного вище ТОВ «УНДКТІ «ДІНТЕМ» розробило нову гуму Д2301. Умови експлуатації ГТВ наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Група гумової суміші	Шифр гумової суміші	Умови експлуатації ГТВ		Основне призначення (види ГТВ)
		Середовище	Температура, °С	
Тепломорозо-мастиlostійкі на основі фтор-сілоксанових каучуків	Д2301 (51-1434)	Повітря з підвищеним вмістом озону; повітря з парами палив і робочих рідин	Від мінус 55 до плюс 200	Формові та неформові ущільнювальні й електроізоляційні вироби для торцевого контактного ущільнення нерухомих та обмежено рухомих з'єднань
		Палива: Jet A-1, ТС-1, Т-6, Т-8, Т-8В; рідина 7-50С-3	Від мінус 55 до плюс 175	
		Робочі рідини: АМГ-10, Б-3В, трансмісійне для гіпоїдних передач, трансформаторне паливо РТ	Від мінус 55 до плюс 150	
		Мастила: ЦИАТИМ-221, ВНИИ НП-279, робоча рідина ИПМ-10,		
		Рідини поліметилсілоксанові типу ПМС-10	Від мінус 55 до плюс 100	
Спирт етиловий технічний	Від мінус 55 до плюс 70			

Гуму Д2301 створено на основі фторсилоксанового каучуку з урахуванням сучасних тенденцій розвитку ущільнювальних систем. Такий підхід є вкрай актуальним, оскільки значне збільшення інтенсивності експлуатації авіаційної техніки ставить нові вимоги до гуми як конструкційного матеріалу. У першу чергу це стосується температурного режиму експлуатації та впливу нових типів палив і мастил нафтового та синтетичного походження.

Гуми на основі фторсилоксанових каучуків забезпечують високу термічну стійкість та, особливо, морозостійкість і здатність довготривало зберігати високі експлуатаційні властивості виробів за одночасного впливу агресивних середовищ і високих температур.

Мета створення рецептури нової гуми:

- підвищення мастило-, паливостійкості шляхом використання нових (не російських) марок каучуку й інших інгредієнтів у рецептурній композиції;

- поліпшення фізико-механічних характеристик шляхом використання в рецептурі нових типів наповнювачів;

- зменшення часу вулканізації, модифікації рецептури композиції.

У рецептурі гуми Д2301 використано органічні пероксиди з нейтральними продуктами розкладу та наповнювачі нейтрального характеру. Вміст компонента агросила при цьому був мінімальним. Як стабілізатори обрано оксид і гідроксид заліза й оксид цинку.

За результатами робіт автори запропонували технологію виготовлення еластомірних матеріалів (гуми) на основі фторсилоксанових каучуків, яка забезпечує отримання гум з комплексом властивостей, необхідних для забезпечення довготривалої експлуатації вузлів і агрегатів авіаційної та космічної техніки.

Показники фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей гуми Д2301, визначені на стандартних вулканізованих зразках, повинні відповідати значенням, що наведені в табл. 3.

Гарантійний термін зберігання невулканізованої гуми Д2301 становить два місяці, її технологічні властивості наведено в табл. 4. Додаткові (довідкові) властивості – в табл. 5.

Таблиця 3

Шифр гумової суміші	Умовна міцність під час розтягування, МПа (кгс/см <sup>2</sup> ), не менше ніж	Відносне видовження в момент розривання, %, не менше ніж	Твердість, од. Шора А, у межах	Відносна залишкова деформація після стискання в повітрі протягом 24 год за температури 200 °С та деформації стиску 20 %, не більше ніж	Зміна маси зразка після впливу палива ТС-1 протягом 24 год за температури 150 °С, %, у межах	Зміна відносно-го видовження в момент розривання після старіння в повітрі протягом 72 год за температури 200 °С, %, у межах
Д2301 (51-1434)	6,4 (65)	200	60–75	45	Від 0 до 12	Від мінус 40 до 10

Таблиця 4

Шифр гумової суміші	Технологічні властивості
Д2301 (51-1434)	Формується, шприцюється під заготовку
<b>Примітка.</b> Термін «шприцюється» означає можливість виготовлення з гумових сумішей шприцьованих профільних виробів з наступною вулканізацією; термін «шприцюється під заготовку» означає можливість виготовлення з гумових сумішей шприцьованих заготовок для подальшого формування.	



Таблиця 5

Шифр гумової суміші	Густина, г/см <sup>3</sup> ± 0,05	Усадка, %, у межах	Коефіцієнт морозостійкості за еластичним відновленням після стискування		Відносна залишкова деформація після розривання, %, не більше ніж	Зміна маси зразка після дії середовища за заданої температури протягом 24 год		
			Температура випробування, °С	Норма, не менше ніж		Випробувальне середовище	Температура випробування, °С	Норма, %
Д2301 (51-1434)	1,46	3,0–5,0	мінус 55	0,15	15	Масило ИПМ-10	120	не більше ніж 6

Дослідний зразок жаростійкої та морозостійкої гумової суміші Д2301 (аналог суміші 51-1434 ТУ 380051166-98 на основі фторсилоксанового полімеру) було виготовлено в ТОВ «УНДКТИ «ДІНТЕМ» і надано до ДП «ХМЗ «ФЕД». Одночасно були надані розроблені режими штучного прискореного старіння цієї гуми в умовах спекотного клімату.

На ДП «ХМЗ «ФЕД» із зазначеної гуми було виготовлено комплект ущільнень (кілець і прокладок) і встановлено в дослідний агрегат паливної системи.

Об'єктами досліджень став комплект ущільнень (кілець і прокладок), виготовлений із гумової суміші Д2301 ТУ У 22.1-00152135-129:2017, а саме:

- 007-010-19-2-061
- 008-011-19-2-061
- 010-013-19-2-061
- 011-014-19-2-061
- 015-018-19-2-061
- 035-038-19-2-061
- 040-043-19-2-061
- 3026.774
- 3026.1517.

Було проведено прискорене кліматичне старіння зразків ГТВ у струбцинах із 20 %-ним стисненням від фактичного значення за режимами, що імітують 12-, 14-, 16-, 18- та 20-річний термін експлуатації з коефіцієнтом запасу на повітрі  $K_3 = 1,5$ .

Основним критерієм оцінки працездатності ущільнювальних ГТВ був показник відносної залишкової деформації стиснення [1]. У наведених нижче табл. 6, 7 подано результати прискорених кліматичних випробувань ГТВ.

Таблиця 6

№ з/п	№ деталі	Показник нагромадження відносної залишкової деформації стиснення, який імітує службу протягом..., %				
		12 років	14 років	16 років	18 років	20 років
1	007-010-19-2-061	30,2	26,9	27,9	28,8	28,8
2	010-013-19-2-061	30,6	31,8	34,1	40,9	40,9
3	011-014-19-2-061	22,9	32,4	33,7	33,7	35,1
4	6.035-038-19-2-061	15,9	36,7	36,7	36,7	40,0
5	040-043-19-2-061	28,1	34,4	34,4	40,6	40,6
6	3026.774	24,0	28,0	9,0	29,0	29,0
7	3026.1517	22,5	31,0	37,5	40,0	40,0

Після детального аналізу табл. 7 можна зробити висновок, що всі ГТВ мають нагромадження відносної залишкової деформації стиснення в межах допустимих значень, яке не перевищує 80 %.

У цілому результати табл. 6 та 7 свідчать про задовільний стан еластичних властивостей ГТВ після 20 років експлуатації.

Таблиця 7

№ з/п	№ деталі	Розмір (діаметр) перерізу, мм		
		у кресленні Ø	до випробувань Ø	після випробувань малий діаметр еліпса Ø
1	007-010-19-2-061	1,9±0,1	1,80–1,82	1,72–1,73
2	008-011-19-2-061	1,9±0,1	1,9–1,92	1,75–1,85
3	010-013-19-2-061	1,9±0,1	1,9–1,91	1,6–1,63
4	011-014-19-2-061	1,9±0,1	1,87–1,89	1,58–1,7
5	015-018-19-2-061	1,9±0,1	1,92–1,95	1,73–1,74
6	035-038-19-2-061	1,9±0,1	1,86	1,75
7	040-043-19-2-061	1,9±0,1	1,85	1,67–1,68
8	3026.774	1,9±0,2	1,95	1,8–1,81
9	3026.1517	1,9±0,2	1,93	1,78–1,80

Також було проведено ресурсно-кліматичні випробування паливного агрегату.

У ході випробувань при досягненні визначеного терміну експлуатації 16 років агрегат було розстиковано по фланцевому з'єднанню корпусу насоса та корпусу регулятора для проміжного огляду і визначення стану досліджуваних ущільнень.

Кільця та прокладка з гуми Д2301 мали задовільний зовнішній вигляд. Кільця мали помітну залишкову деформацію перерізів, яка була в межах вимог нормативно-технічної документації. Інших дефектів не виявлено.

Для оцінювання стану мембран з гуми Д2301, установлених в агрегат, було демонтовано одну мембрану нульового перепаду. Робоча поверхня мембранного полотна та поверхні в зоні защемлення перебували в задовільному стані. Поривів, розтягування й інших дефектів експлуатації не виявлено.

На останньому етапі випробування з метою визначення максимально можливого терміну працездатності в агрегаті на стенді були завершені в момент, еквівалентний 24 рокам експлуатації.

Агрегат було розібрано, і досліджувані ГТВ вилучені з місць установлення. Під час демонтажу (розтягування) кілець поривів або розтріскування гуми не виявлено. Це означає, що гума Д2301 в досліджуваних ГТВ навіть після умовного терміну експлуатації в 20 років зберегла на достатньому рівні пружно-еластичні властивості.

При візуальному огляді кілець і прокладок після ресурсно-кліматичних випробувань дефектів експлуатації (пориви, зношеність, тріщини, вичавлювання в зазор тощо) не виявлено. Поверхні дослідних ГТВ мають задовільний зовнішній вигляд. На досліджуваних кільцях і прокладках була помітна залишкова деформація профілю (перерізу), тобто приплюснення за висотою в напрямку дії стиснення в ущільнювальному з'єднанні, яка була в межах, визначених нормативною документацією.

Перерізи кілець і прокладок не набували форми посадкових канавок, зберегли (хоч і зменшений) натяг у межах від 0,1 до 0,15 мм, який забезпечив герметичність агрегату під час випробувань.

Результати порівняльних випробувань ГТВ щодо інших показників (твердість гуми та втрата міцності) наведено в табл. 8.

Таблиця 8

№ з/п	№ деталі	Твердість за Шором А, од. Шора А		Умовна міцність під час розтягування, МПа	
		згідно з ТУ У 22.1-00152135-129:2017	після випробувань	згідно з ТУ У 22.1-00152135-129:2017	після випробувань
1	007-010-19-2-061	60–72	64	6,4	–
2	008-011-19-2-061		67		–
3	010-013-19-2-061		69		–
4	011-014-19-2-061		65		–
5	5.015-018-19-2-061		70		–
6	6.035-038-19-2-061		63		2,3
7	040-043-19-2-061		71		7,3
8	3026.774		66		4,05
9	3026.1517		68		3,3

Аналізуючи показники табл. 8, можна відзначити зменшення показників твердості гуми за Шором А та міцності під час розтягування в межах 50 %, що є меншим за критичний рівень зменшення показника – 50 %.

За результатами дослідження, після прискорених кліматичних випробувань, було обґрунтовано можливість підвищення заданого терміну експлуатації працездатності агрегатів паливної системи до першого ремонту з 12 до 20 років в умовах спекотного клімату.

Крім того, в дослідному агрегаті були встановлені гумово-тканинні мембрани, виготовлені із мембранного полотна ПМП-1 ТУ У 22.1-00152135-167:2021 виробництва ТОВ «УНДКТИ «ДІНТЕМ». Мембрани в комплекті з ГТВ на основі гуми Д2301 успішно пройшли ресурсно-кліматичні випробування під час експлуатації агрегату протягом 16 років в умовах спекотного клімату. Після 19,5 років експлуатації візуальним оглядом встановлено, що дефектів експлуатації (поривів, відшарування гуми, розтягування, пережимів тощо) на полотні не виявлено, але органолептично відчувається значне затвердіння мембранного полотна, тоді як при проміжному огляді мембрани після 16 років експлуатації еластичність мембранного полотна була в задовільному стані.

Таким чином, гумову суміш марки Д2301 можна використовувати для виготовлення жаро- і морозостійких ГТВ для ущільнень авіаційних агрегатів, які експлуатують у країнах зі спекотним кліматом.

Проведені ресурсно-кліматичні випробування дають підставу для збільшення умовного терміну експлуатації агрегату паливних агрегатів до першого ремонту в умовах спекотного клімату з 12 років до 16 років за умови комплектації агрегату ущільненнями з гумової суміші Д2301 з твердістю не менше 70 од. Шора А.

Таким чином, розроблену гуму Д2301 можна використовувати для виготовлення ГТВ, які застосовують за високих температур

у середовищі палив і мастил нафтового походження.

За результатами випробувань також рекомендовано розглянути можливість розширення номенклатури ГТВ (гумова суміш Д2301) для використання в інших проблемних місцях агрегату паливних систем з метою збільшення надійності герметичності та працездатності протягом терміну служби 16 років і більше.

#### **Список використаної літератури**

1. Lepetov V. A., Yurtsev L. N. Raschet i konstruirovaniye rezinovykh izdeliy. Moskva. Khimia. 1971. 417 s.

Стаття надійшла 14.11.2023