

Канд. техн. наук В. А. Шульга, А. І. Підгайний, Д. С. Мудров

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ РОЗДІЛЬНИХ ДІАФРАГМ ДЛЯ СИСТЕМ ЗБЕРІГАННЯ ТА ПОДАВАННЯ ПАЛИВА В ПАЛИВНИХ БАКАХ РРД

Подано результати комплексних досліджень працездатності роздільних діафрагм для систем зберігання та подавання палива в паливних баках РРД. Актуальність теми обумовлено необхідністю забезпечення надійного розділення газової та рідинної фаз під час експлуатації виробів у змінних робочих умовах. З огляду на це особливу увагу приділено автономним стендовим випробуванням, які дають змогу оцінити основні експлуатаційні характеристики діафрагм до їх інтеграції у серійні вироби. Розглянуто процес формозміни сферичних діафрагм під дією зовнішнього навантаження, проведено аналітичний розрахунок початкового радіуса вивертання діафрагми та визначено критичні тиски, що викликають втрату стійкості. Розрахункові дані показали задовільну збіжність з експериментальними результатами, отриманими в ході випробувань. Описано методику проведення довідних випробувань, під час яких було випробувано п'ять варіантів діафрагм. З метою підвищення якості виробів реалізовано комплекс технологічних і конструктивних заходів: збільшення кількості переходів під час витягування з проміжним відпалом, зменшення товщини заготовки, збільшення нерозкочуваної полюсної зони. Доведено, що основним фактором, який впливає на бездефектне вивертання діафрагми, є зменшення кількості проходів обкатним роликком, що дає змогу уникнути надривів поверхневого шару металу. Результати випробувань діафрагм показали задовільні результати. Аналіз змін перепадів тиску на діафрагмах під час перекладання підтвердив відповідність отриманих значень вимогам технічного завдання. Зроблено висновок, що конструкція діафрагми, у якій враховано всі коригувальні заходи, забезпечує бездефектне вивертання за умови дотримання заданих характеристик перепаду тиску та рекомендована для подальших випробувань у складі штатних баків.

Ключові слова: міцнісні характеристики; авіаційна та ракетно-космічна техніка; проєктні параметри; математичне моделювання; паливний бак; роздільна діафрагма; автономні стендові випробування; критичний тиск.

This paper presents the results of comprehensive research on the operational performance of diaphragm separators utilized in the fuel storage and supply systems for liquid-propellant rocket engines (LPRE). The relevance of this study arises from the need to ensure the reliable separation of gas and liquid during the operation of aerospace systems under different conditions. In this context, special attention is given to autonomous bench tests that enable the evaluation of the key performance parameters of diaphragms before integrating them into production models. The paper examines the shape transformation of spherical diaphragms under external loads, presents an analytical calculation of the initial diaphragm inversion radius, and identifies the critical pressures that cause buckling. The results of this calculation demonstrate a satisfactory correlation with the experimental data obtained during testing. The methodology for qualification tests conducted on five different diaphragm variants is described. Several technological and design measures have been implemented to enhance product quality. They included increasing the number of drawing passes from two to three with intermediate annealing, reducing the thickness of the blanks, and enlarging the non-rolled polar zone. It was found that the primary factor ensuring defect-free diaphragm inversion is the reduced number of roller passings along the diaphragm contour, which prevents the tearing of the surface layer. The test results for different diaphragm variants confirmed satisfactory performance. An analysis of pressure differentials across the diaphragms during inversion confirmed compliance with the technical specifications. The study concluded that the diaphragm design, when it incorporates all corrective measures, ensures defect-free inversion while maintaining the required pressure differential and is recommended for further testing as part of standard tank assemblies.

Keywords: strength parameters; aircraft, space and rocket technologies; design parameters; mathematical simulation; fuel tank; separation diafragma; autonomous bench testing; critical pressure.

Вступ

Розроблення та вдосконалення систем зберігання та подавання робочої рідини в баках різного призначення залишається одним із актуальних завдань у галузі ракетно-космічної техніки. До ключових елементів таких систем належать паливні баки з механічними роздільниками, зокрема роздільними діафрагмами, що забезпечують надійне розділення газової та рідинної фаз, а також ефективне витіснення рідини за змінних робочих умов [1, 2].

Якісні характеристики діафрагм, зокрема їхні міцнісні та деформаційні властивості, безпосередньо впливають на працездатність усієї системи [3, 4]. У зв'язку з цим особливого значення набувають автономні стендові випробування, які дають змогу оцінити функціональні параметри діафрагм до їх інтеграції у серійні вироби [5, 6, 7].

Метою цієї роботи є проведення автономних випробувань діафрагм у складі діафрагмових блоків (ДБ) рознімних баків та аналіз їх результатів, а також підтвердження правильності прийнятих конструктивних і технологічних рішень. Випробування, якими передбачено комплексну перевірку основних експлуатаційних характеристик, проводили відповідно до затвердженої програми довідних випробувань.

Результати проведених досліджень дають змогу сформулювати рекомендації щодо подальшої оптимізації конструкції діафрагм, а також оцінити їх відповідність вимогам нормативно-технічної документації.

Розрахунок вивертання діафрагми

Попередньо перед проведенням випробувань було виконано розрахунок процесу пластичної формозміни сферичної діафрагми, до поверхні якої прикладено навантаження, що виникає під час роботи виробу за методикою, прийнятою на ДП «КБ «Південне».

Було розглянуто оболонку обертання, затиснену за допомогою відборткування її торцевого перерізу на жорсткому нерухомому контурі. До зовнішньої поверхні діафрагми прикладено нормальний тиск.

Під дією нормального тиску, що виникає, настає момент, коли у відбортванні діафрагми на стикові її з корпусом утворюється

вузька вісесиметрична кільцева пластична область тороподібної форми з радіусом r . Ця область відіграє роль, аналогічну пластичним шарнірам, які виникають під час вигину балки та перетворюють розглядувану діафрагму, пружно опірну до цього моменту дії зовнішнього тиску, у рухомий пластичний механізм [8]. Унаслідок інтенсивної плинності матеріалу діафрагми в утвореній пластичній області оточена нею по контуру центральна частина оболонки, що продовжує зберігати пружність, починає переміщуватись уздовж осі симетрії [9].

Деформування оболонки протягом усього процесу формозміни має лінійний характер і зосереджене в малому об'ємі пластичної області в зоні вивертання.

У матеріалі діафрагми, що перебуває на значному віддаленні від пластичної області, напруження значно менші за границю плинності [10]

$$\sigma_r, \sigma_t \ll \sigma_{\text{п}},$$

де σ_r – радіальні напруження; σ_t – тангенціальні напруження.

З метою виключення втрати стійкості діафрагми її виконують зі змінною товщиною. Товщина до полюса діафрагми збільшується. За обраними рекомендованими товщинами визначають початковий радіус вивертання діафрагми.

Якщо геометрію діафрагми (радіус і товщину) обрано з технологічних міркувань, то початок вивертання діафрагми визначають за заданим початковим радіусом вивертання.

Радіус вивертання діафрагми визначали за формулою

$$r_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_i \delta_i}{\sin \varphi_i - \varphi_i \cos \varphi_i}},$$

де $R_i = R_1 \sin \varphi_i$ – радіус кривини паралелей діафрагми; R_1 – радіус сфери діафрагми; φ_i – кут, утворений нормаллю до серединної поверхні діафрагми та віссю симетрії; δ_i – товщина діафрагми в розглядуваному перерізі.

Початковий радіус перекочування діафрагми визначають за $\varphi = \varphi_0$.

Унаслідок пластичних деформацій матеріал пливе: відбувається подовження матеріалу і, відповідно, його стоншення, в залежності від радіуса паралелі діафрагми,

що визначається кутом нахилу перерізу діафрагми.

Товщину діафрагми у відповідних перерізах після вивернення визначають за формулою

$$\delta_i = \delta_{0i} \left(1 - \sqrt{\frac{\delta_{0i}}{R_i} (1 - \varphi_i \cdot \operatorname{ctg} \varphi_i)} \right),$$

де δ_{0i} – початкова товщина у відповідному перерізі до вивертання; R_i – радіус паралелі, що відповідає куту нахилу перерізу φ_i .

За кінцевою товщиною в цьому перерізі визначають відносне подовження матеріалу в цьому перерізі за формулою

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_{0i} - \delta_i}{\delta_{0i} \cdot \mu_{\text{пл}}},$$

де $\mu_{\text{пл}} = 0,5$ – коефіцієнт Пуассона для пластичного деформування.

Границю плинності матеріалу діафрагми для кожного її перерізу визначали за формулою

$$\sigma'_{\text{пн}} = \sigma_{\text{пн}} + \frac{\sigma_{\text{т.о.}} - \sigma_{\text{п}}}{\varepsilon_{\text{т.о.}}} \cdot \frac{\delta_{0i} - \delta_i}{\delta_i} \cdot \frac{1}{\mu_{\text{пл}}},$$

де $\sigma_{\text{пн}}$ – границя плинності матеріалу з урахуванням зміцнення діафрагми у відповідному перерізі; $\sigma_{\text{т.о.}}$ – тимчасовий опір матеріалу діафрагми; $\sigma_{\text{п}}$ – границя плинності матеріалу діафрагми; $\varepsilon_{\text{т.о.}}$ – граничне відносне подовження матеріалу; δ_{0i} – початкова товщина діафрагми у відповідному перерізі; δ_i – товщина діафрагми в перерізі після вивернення; $\mu_{\text{пл}} = 0,5$ – коефіцієнт Пуассона в пластичній області.

Значення перепаду тиску для кожного перерізу, за якого починає вивертатися діафрагма, визначали за формулами:

– для максимального тиску

$$p_{\text{сф}}^{\text{в}} = \frac{4\tau_{\text{си}}\delta_i}{R_{0i} \sin \varphi_i} \cdot \sqrt{\frac{\delta_i}{R_{0i}}} \tilde{\varphi}_{\varphi_i} \left(1 - \frac{3}{4} \sqrt{\frac{\delta_i}{R_{0i}}} \tilde{\varphi}_{\varphi_i} \right);$$

– для мінімального тиску

$$p_{\text{сф}}^{\text{н}} = \frac{2\sqrt{3}\tau_{\text{си}}\delta_i}{R_{0i} \sin \varphi_i} \cdot \sqrt{\frac{\delta_i}{R_{0i}}} \tilde{\varphi}_{\varphi_i} \left(1 - \frac{3}{4} \sqrt{\frac{\delta_i}{R_{0i}}} \tilde{\varphi}_{\varphi_i} \right),$$

де $\tau_{\text{си}} = \sigma_{\text{пн}} \cdot 0,68$ – границя плинності матеріалу діафрагми на зріз в i -тому перерізі з урахуванням зміцнення; $\sigma_{\text{пн}}$ – границя плинності матеріалу у відповідному перерізі; δ_i – тов-

щина діафрагми в i -тому перерізі для відповідного кута φ_i ; $R_{0i} = R_1 + r_i$ – радіус центра зони перекочування; $\varphi_{\varphi_i} = \sin \varphi_i - \varphi_i \cos \varphi_i$; φ_i – кут, утворений нормаллю до серединної діафрагми та віссю симетрії.

Радіус вивертання діафрагми для i -того перерізу визначали за формулою

$$r_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_i \delta_i}{\sin \varphi_i - \varphi_i \cos \varphi_i}}.$$

Значення тиску вивертання діафрагми має бути меншим за значення критичного тиску, що викликає втрату стійкості діафрагми.

Критичний тиск, що викликає втрату стійкості діафрагми, визначали за формулою

$$p_{\text{кр}} = 0,2E \left(\frac{\delta_{0i}}{R_i} \right)^2,$$

де E – модуль пружності матеріалу діафрагми.

Унаслідок пластичного вивертання діафрагми наприкінці роботи сферична діафрагма перетворюється на сферичну панель [11].

Втрату стійкості панелі визначали за формулою

$$q_{\text{т.о.}} = \nu_{\text{т.о.}} \cdot p_{\text{кр}},$$

де $\nu_{\text{т.о.}}$ – поправковий коефіцієнт за втрати стійкості панелі.

Запас стійкості визначали за формулою

$$n_{\text{с}} = \frac{p_{\text{кр}}}{p_{\text{сф}}} \geq 2,$$

де $p_{\text{сф}}$ – перепад тиску.

Результати розрахунку показали, що тиск вивертання діафрагми лежить у межах 0,52–0,87 кгс/см².

Методика проведення та аналіз результатів випробувань

Методика автономного відпрацювання діафрагм паливних баків охоплює проведення послідовно трьох етапів:

– перевірки працездатності діафрагми за вільного вивертання без обмеження нижньою напівсферою (І етап);

– перевірки працездатності діафрагми у складі розніжного бака із заповненням рідиною порожнини водою та поетапним пневмо-навантаженням газової порожнини (ІІ етап);

Другий етап передбачав випробування трьох діафрагм у складі рознімного бака (рис. 3).

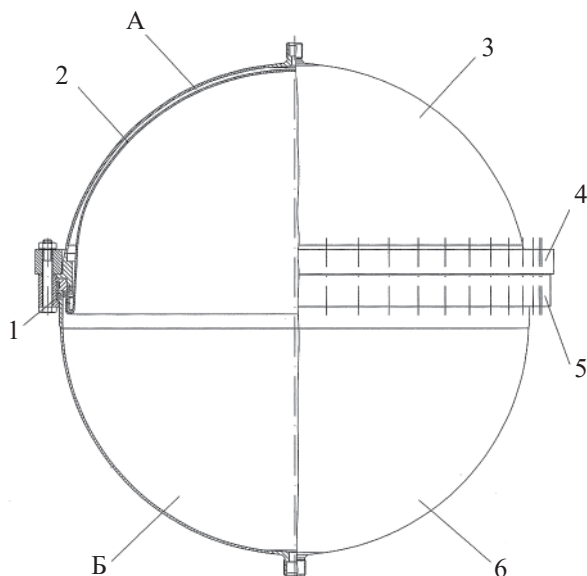


Рис. 3. Рознімний бак:

1 – ущільнювальне кільце; 2 – ДБ; 3 – верхній корпус; 4 – кільце; 5 – фланець; 6 – нижній корпус; А – газова порожнина; Б – рідинна порожнина

Випробування № 2–4 проводили з діафрагмами конструктивного виконання варіанта 1 (заготовка – лист 3 мм, нерозкочувана полюсна зона $S = 2,6$ мм, $d = 120$ мм, $L = 8$ мм, $R = 150$ мм) за схемою, наведеною на рис. 4.

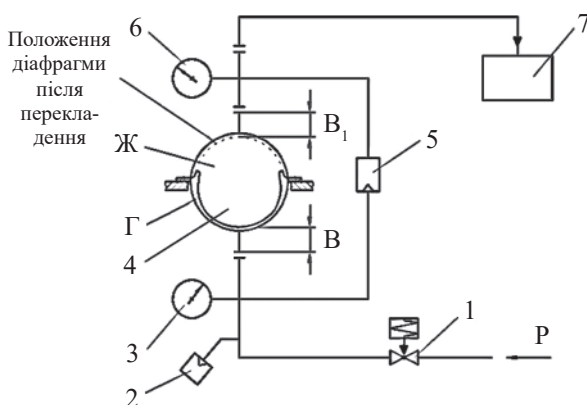


Рис. 4. Схема випробування діафрагми у складі рознімного бака із заповненням порожнини «Ж» водою та поетапним навантаженням порожнини «Г» повітрям:

1 – вентиль; 2 – датчик тиску; 3, 6 – манометр; 4 – рознімний бак; 5 – диференційний датчик тиску; 7 – резервуар для зливу; Г – газова порожнина; Ж – рідинна порожнина; Р – подача повітря

Вивертання діафрагм без протитиску з боку рідинної порожнини (випробування № 1–4) проводили на ДБ № 20, 38, 39, 40. Межі отриманих значень перепадів тиску на діафрагмах наведено в табл. 2.

Проведені випробування підтвердили міцність і герметичність діафрагм після вивертання. Значення перепадів тиску на діафрагмах під час випробувань № 2–4, що наведені в табл. 2, відповідають вимогам.

Результати випробувань другого етапу дали змогу перейти до наступного (третього) етапу – випробувань вивертання діафрагм в умовах, наближених до штатних.

На **третьому етапі** проводили вивертання діафрагм із витісненням рідини за тиску в газовій порожнині $P_{\text{роб}} = 15$ кгс/см² та об'ємної витрати води $Q = (0,52 - 0,54)$ дм³/с.

Випробування проведено для однієї діафрагми конструктивного варіанта 1 (заготовка – лист 3 мм, нерозкочувана полюсна зона $S = 2,6$ мм, $d = 120$ мм, $L = 8$ мм, $R = 150$ мм) (ДБ № 43) – випробування № 5 та однієї діафрагми конструктивного варіанта 2 (заготовка – лист 3 мм, нерозкочувана полюсна зона $S = 2,6$ мм, $d = 120$ мм, $L = 8$ мм, $R = 200$ мм) (ДБ № 49) – випробування № 6.

Випробування проводили за схемою, наведеною на рис. 5.

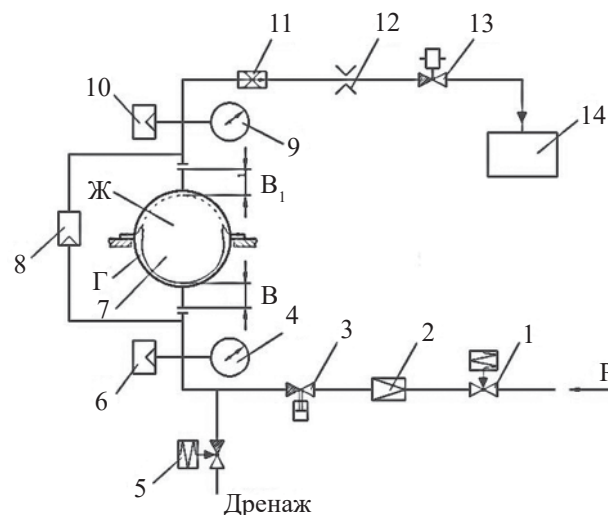


Рис. 5. Схема випробування на спрацювання:

1, 5 – вентиль; 2 – редуктор; 3 – пневмоклапан; 4, 9 – манометр; 6, 10 – датчик тиску; 7 – рознімний бак; 8 – диференційний датчик тиску; 11 – перетворювач витрати; 12 – жиклер; 13 – електроклапан; 14 – резервуар для зливу; Г – газова порожнина; Ж – рідинна порожнина; Р – подача повітря

Випробування двох ДБ № 43 та 49 було проведено в штатних умовах витіснення рідини. Результати випробувань задовільні. За заданих умов порушення цілісності та герметичності діафрагм не виявлено. Надривів і гофрування поверхні немає. Таким чином, працездатність діафрагми конструктивних варіантів 1 і 2 у складі паливного бака підтверджено.

Під час роботи рушійної установки (РУ) подавання компонентів палива в камеру двигуна відбувається за допомогою пневмонасосного агрегата з двох баків кожного з компонентів палива. Та через розкид жорсткості діафрагм можливе нерівномірне вичерпання компонентів палива, що може призвести до зміни положення центру мас РУ, що в свою чергу впливає на керування польотом.

Тому для оцінення рівномірності вичерпання компонентів палива було проведено спеціальні випробування з діафрагмами нової партії (у кількості 10 шт.), що передбачають паралельне витіснення рідини з двох баків.

Проте після вивернення на поверхні діафрагм було виявлено поверхневі надриви завглибшки приблизно 0,2 мм, що стали наслідком локальних розривів поверхневого шару (рис. 6) у місцях нагартування від багаторазових проходів обкатного ролика (до восьми проходів).

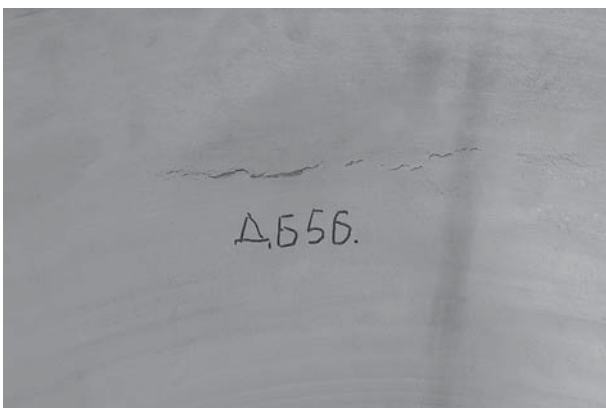


Рис. 6. Надриви поверхневого шару

Розриви поверхневого шару матеріалу діафрагми утворюються у двох випадках:

- під час розкочування діафрагми за заданим профілем, коли перед розкочувальним роликом накопичується великий об'єм металу у вигляді валика, поверхня якого

розтріскується через значні напруження (зазвичай у зоні $S = 2$ мм);

- у разі вивертання діафрагми за радіусом у зоні $S = 2$ мм, коли значення радіуса вивертання малі, близькі до номінального. У цих умовах виникають найбільші напруження під час стиснення поверхневого шару та наступного розтягування. У місцях нагартування поверхневого шару з'являються надриви.

Для зменшення об'єму розкочуваного металу вздовж контуру профілю діафрагми (зменшення кількості проходів обкатним роликом уздовж контуру діафрагми) було проведено технологічні та конструктивні заходи:

- збільшення кількості переходів під час витягування діафрагми з двох до трьох з проміжним відпалом за температури 325 °С протягом 20 хв;

- зменшення товщини листової заготовки з 3 до 2,6 мм;

- збільшення нерозкочуваної полюсної зони діафрагми до Ø 230 мм та Ø 370 мм.

З урахуванням зазначених заходів за результатами випробувань з оцінювання рівномірності вичерпання компонентів палива повторно було проведено третій етап автономних випробувань з доопрацьованими конструктивними варіантами діафрагм.

Послідовно було проведено випробування № 7, 8 з ДБ № 56, 59 (діафрагми варіанта 3) та випробування № 9, 10 з ДБ № 99, 6 (з діафрагмами варіантів 4 та 5 відповідно).

Випробування діафрагм варіанта 3 (з вихідною заготовкою $S = 2,6$ мм, виготовленою з листа завтовшки 3 мм хімічним фрезеруванням та з нерозкочуваною зоною Ø120 мм) не дали позитивних результатів. Після вивернення діафрагм було виявлено надриви поверхневого шару.

Випробування діафрагм варіантів 4 та 5 (заготовка $S = 2,6$ мм, нерозкочувані полюсні зони Ø230 мм та Ø370 мм відповідно) показали задовільні результати. Надривів поверхневого шару діафрагм після вивернення не виявлено, значення перепадів тиску на діафрагмах у процесі вивертання відповідають вимогам.

З аналізу технології виготовлення діафрагм випливає, що основним фактором, який забезпечує бездефектне перекладання

(без надривів поверхневого шару), є мінімальна кількість проходів обкатним роликом по профілю діафрагми. Ця позитивна особливість властива діафрагмам з нерозкочуваною полюсною зоною Ø370 мм (варіант 5) (рис. 7). Кількість проходів обкатним роликом уздовж контуру діафрагми – не більше трьох (на інших 5–6).



Рис. 7. Вивернута діафрагма варіанта 5

Для підтвердження працездатності діафрагм конструктивного варіанта 5 було проведено порівняльні випробування № 11–14 з ДБ № 57, 58 (діафрагми варіанта 5, нерозкочувана полюсна зона Ø370 мм) та № 59*, 60 (діафрагми варіанта 3, нерозкочувана

полюсна зона Ø120 мм). Витіснення рідини з баків проводили в чотири етапи:

- 1) вивертання діафрагми протягом ~110 с;
- 2) вивертання діафрагми протягом ~55 с;
- 3) вивертання діафрагми протягом ~55 с;
- 4) вивертання діафрагми до повного витіснення рідини.

Графіки зміни перепадів тиску на діафрагмах $\Delta P_{\text{діафр}} = f(Q_{\text{рідини}})$ під час випробувань ДБ № 57, 58, 59*, 60 наведено на рис. 8.

Основні характеристики діафрагм, отримані в результаті випробувань, наведено в табл. 3.

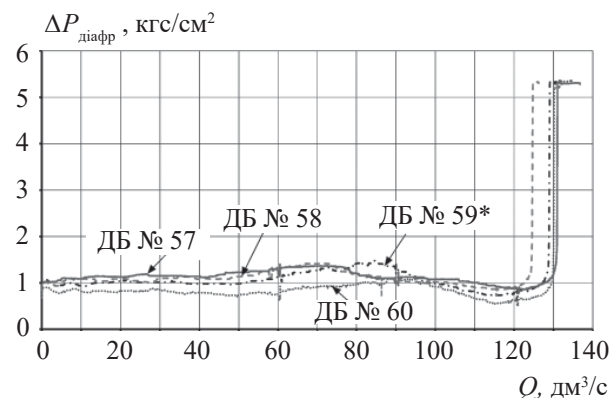


Рис. 8. Графік $\Delta P_{\text{діафр}} = f(Q_{\text{рідини}})$
ДБ № 57, 58, 59*, 60

Таблиця 3

Основні характеристики діафрагм, отримані в результаті випробувань

Номер випробування	11	12	№ 13	№ 14
Заводський № ДБ	57	58	59*	60
Об'єм заправки порожнини «Ж», дм³	128,8	129,7	129,5	128,85
Об'єм невитісненої рідини, дм³	0,6	0,45	0,56	0,58
Варіант діафрагми	5	5	3	3
Початок торкання діафрагми, Δp кгс/см²	0,82	0,83	0,91	0,81
Максимальний перепад за витіснення ~80 % об'єму	1,42	1,36	1,37	1,12
Закінчення вивертання діафрагми, Δp кгс/см²	1,26	1,42	1,32	1,3
Особливості вивертання діафрагми	Вивертання з витісненням рідини за $p = 15$ кгс/см²	Вивертання з витісненням рідини за $p = 15$ кгс/см²	Вивертання з витісненням рідини за $p = 15$ кгс/см²	Вивертання з витісненням рідини за $p = 15$ кгс/см²
Наявність дефектів діафрагми після вивертання	Надривів та гофрування поверхні немає	Надривів та гофрування поверхні немає	Надривів та гофрування поверхні немає	Надривів та гофрування поверхні немає. Є місцева опуклість
Особливості конструкції діафрагми	Лист 2,6 мм, $d = 370$ мм	Лист 2,6 мм, $d = 370$ мм	Лист 2,6 мм, $d = 120$ мм	Лист 2,6 мм, $d = 120$ мм

Примітка. Витіснення відбувається в чотири етапи без скидання тиску газу в порожнині бака.

З аналізу графіків $\Delta P_{\text{діафр}} = f(Q_{\text{рідини}})$ ДБ № 57, 58, 59*, 60 з діафрагмами конструктивних варіантів 3 та 5 випливає, що характер зміни перепадів тиску на діафрагмах у процесі їх перекладання ідентичний. Значення перепадів тиску в момент початку перекладання діафрагми, в момент витіснення приблизно 80 % об'єму рідини та в момент завершення перекладання лежать у заданих межах (див. табл. 3).

Експериментальні значення тиску вивертання (торкання) діафрагми лежать у межах 0,64–0,95 кгс/см², що підтверджує задовільну збіжність розрахунку. Мінімальне значення критичного тиску, за якого може статися втрата стійкості, дорівнює 5,95 кгс/см². Запас стійкості – не менше ніж 5, що значно вище запасів, потрібних за нормами міцності ($n_c \geq 2$).

Висновки

У результаті проведених випробувань було перевірено працездатність п'яти варіантів діафрагм, які з'явилися в процесі виконання заходів щодо покращення технології виготовлення та працездатності. Установлено й експериментально доведено, що мінімальна кількість проходів обкатним роликом по профілю діафрагми прямо впливає на бездефектне її вивертання. У цьому полягає наукова новизна роботи, а отримані результати мають безпосереднє прикладне значення для розроблення та вдосконалення паливних баків РРД. Після реалізації зазначених заходів конструкція діафрагми варіанта 5 забезпечує бездефектне перекладання за заданих значень перепадів тиску, що відповідають вимогам, і її рекомендовано для подальших випробувань у складі штатних баків.

Список використаної літератури

1. Ballinger I. A., Lay W. D., Tam W. H. Review and History of PSI Elastomeric Diaphragm Tanks. *31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*. 10–12 July 1995, San Diego, CA, USA. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.1995-2534>.
2. Hartwig J. W. A detailed historical review of propellant management devices for low gravity propellant acquisition. *52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 25–27 July 2016, Salt Lake City, USA. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2016-4772>.
3. Lenahen B., Gangadharan S., Desai M. A Computational and Experimental Analysis of Spacecraft Propellant Tanks Implemented with Flexible Diaphragms. *Proceedings of the 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*. Boston, Massachusetts, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2013-1886>.
4. Sabaghzadeh H., Shafaei M. Reversal modeling and optimal design of hyper-elastic diaphragm in space fuel tanks. *SN Applied Sciences*. 2021. Vol. 3, Article number: 792. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04785-0>.
5. Conomos H. A., Alongi C. G., Moore J., Yager J., Goddard R., Salzler T., Fetes J., Burch K. Development of 10 inch Diameter Titanium Rolling Metal Diaphragm Tank for Green Propellant. *AIAA Propellant Storage and Management II*. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2017-4915>.
6. Jørholm T., Korsvold S., Sandvold P., Luktvasslimo Ø., Snilsberg K. E. Roadmap towards a qualified aluminium green propellant diaphragm tank. *Aerospace Europe Conference 2023 – 10th EUCASS – 9th CEAS*, 9–13 July 2023, Lausanne, Switzerland. Lausanne: EUCASS. DOI: <https://doi.org/10.13009/EUCASS2023-093>.
7. Shen Y. A computational analysis of reversal behaviors of a spacecraft propellant management device. *International Conference Optoelectronic Information and Optical Engineering (OIOE 2024)*, 2024, Wuhan, China. Bellingham: SPIE, 2025. (Proceedings of SPIE; Vol. 13513). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.3045569>.
8. Windisch M., Beck R. Numerical Simulation and Optimisation of a Hemispherical Metallic Membrane Designed for Positive Expulsion of a Propellant Tank (for Replacement of Conventional PMD). *Spacecraft Structures, Materials and Mechanical Testing: Proceedings of a European Conference*, 4–6 November 1998, Braunschweig, Germany. Paris: European Space Agency (ESA), 1999. Vol. 428. P. 45. ISBN 9290927127.

9. Мудров Д. С., Зіль В. В. Дослідження напружено-деформованого стану витискних діафрагм. *Геотехнічна механіка*: зб. наук. праць. / Ін-т геотехн. мех. ім. М.С. Полякова НАН України. Дніпро, 2016. Вип. 131. С. 173–182.

10. Можаровський М. С. Теорія пружності, пластичності і повзучості: підруч-

ник / М. С. Можаровський. К. : Вища школа, 2002. 308 с.

11. Libai A., Simmonds J.G. *The Nonlinear Theory of Elastic Shells*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. 564 p. ISBN 978-0-521-01976-7.

Стаття надійшла 10.01.2025