

УДК 620.22

ТЕНЗОМЕТРИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПАЛИВНОГО БАКА

О. В. ЛІТОТ¹, Т. А. МАНЬКО²

¹ Державне підприємство “Конструкторське Бюро “Південне” ім. М. К. Янгеля”, Дніпро;

² Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Досліджено суцільнокомпозитний кріогенний паливний бак за надлишкового тиску рідкого азоту і повторення циклів заправлень/зливу. Створено алгоритм обробки тензометричних результатів та виконано обчислювальний експеримент. Для контролю стану тонкостінних силових оболонок з вуглепластику запропоновано й реалізовано аналітичну технологію обробки та оцінки стану конструкції за надлишкового тиску рідкого азоту. Підтверджено, що конструкція під час випробувань ефективно сприймає навантаження та деформується без відмінностей як за повторів навантажень, так і зі збільшенням тиску.

Ключові слова: тензометрія, алгоритм обробки, паливний бак, вуглепластик, кріогенні температури.

Solid composite cryogenic fuel tank was studied during tests with excess pressure of liquid nitrogen during repeated filling/draining cycles. An algorithm for processing tensometric measurements was created and a computational experiment was performed. To control the condition of thin-walled power shells made of carbon fiber, a visual analytical technology of processing and assessing the condition of the structure during tests with excess pressure of liquid nitrogen was proposed and implemented. It is confirmed that the structure in the process of testing effectively accepts the load and is deformed with no differences both under repeated loading and increased pressure.

Keywords: tensometric, processing algorithm, fuel tank, carbon fiber, cryogenic temperatures.

Вступ. Питання міцності конструкцій ракетно-космічної техніки були й залишаються одними з найважливіших напрямків наукових досліджень. У реальних умовах багато цих об'єктів перебувають в пружно-деформованому стані під час експлуатації внаслідок впливу на них силових керованих і некерованих навантажень. Одним із методів їх оцінювання є спеціальні експериментальні дослідження, під час яких, керуючи силовими навантаженнями, вимірюють деформації та переміщення поверхні за допомогою тензометрії [1]. Тензометричні результати містять інформацію про пружно-деформований стан поверхні об'єкта випробувань. Особливість композитних паливних баків – шарувата структура зі змінною схемою армування по поверхні, що обумовлено технологією їх виготовлення [2]. Статистична обробка тензометричних результатів дає змогу коректно розглядати тільки регулярну циліндричну ділянку паливного бака. Розміщення тензометричних давачів на поверхні днищ або уздовж армування стрічки обумовлене необхідністю оцінювання критичних значень деформацій, які передують руйнуванню конструкції, і під час обробки тензометричних результатів не враховуються.

Формулювання задачі. Досліджували суцільнокомпозитний кріогенний паливний бак, випробовуючи його надлишковим тиском рідкого азоту. Матеріал

Контактна особа: О. В. ЛІТОТ, e-mail: kbu.litot@gmail.com

конструкції достатньо вивчений і його можна експлуатувати за криогенних температур [3]. Під час досліджень для одержання доступу до візуального спостереження, а також розміщення тензодавачів, зовнішню поверхню силової оболонки теплоізоляцією не покривали [4]. На рис. 1 проілюстровано об'єкт випробувань та схему установки тензометричних давачів на його поверхні.

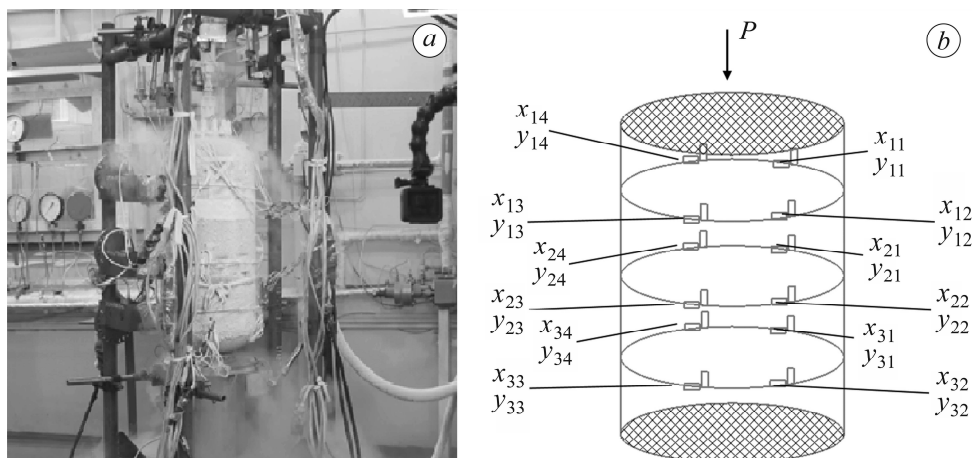


Рис. 1. Об'єкт випробувань (а) та схема установки тензорезисторів (b).

Fig. 1. The test object (a) and chart of the strain gauge installation (b).

Під час випробувань фіксували покази тензометричних давачів. Крім цього, відслідковували зміну тиску на магістралі трубопроводу заправлення й дренажу, а також температуру середовища випробування на вході, виході та на поверхні паливного бака. Отриманий обсяг даних візуально аналізували (без етапів охолодження конструкції, заправлення/зливу, витримки тощо). Структурну схему випробувань показано на рис. 2.

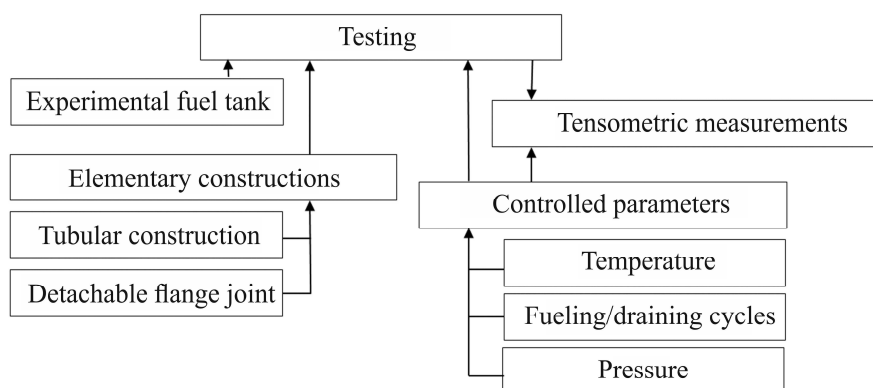


Рис. 2. Структурна схема випробувань.

Fig. 2. Structural test chart.

Загальний графік подачі тиску та повторів заправлення/зливу показано на рис. 3.

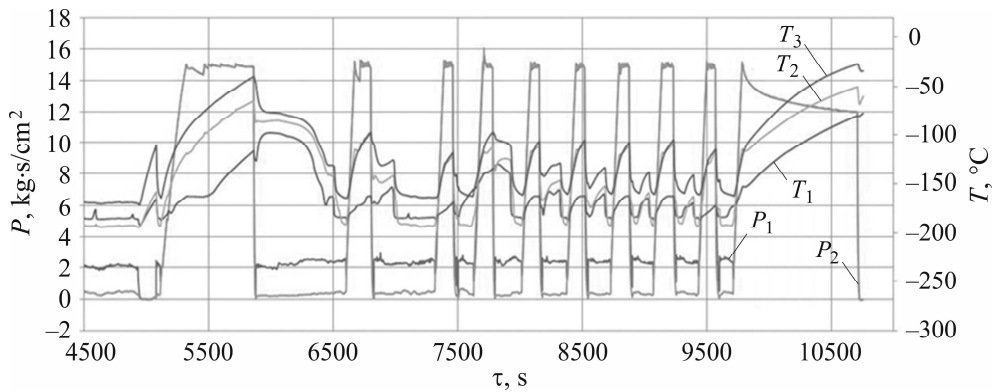


Рис. 3. Зміна температури (T_1, T_2, T_3) та тиску (P_1, P_2) під час випробувань.

Fig. 3. Change in temperature (T_1, T_2, T_3) and pressure (P_1, P_2) during tests.

Вимірювали під час повторних циклів заправки/зливу ($r = 1; 2; \dots; 10$) зі збільшенням тиску за кожного циклу $P = 2; 3; \dots, 15 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$. Під час випробувань керованими параметрами були тільки тиск P і повтори r . Отримали $n = 12$ вимірів у точках $x(i, j)$ і $y(i, j)$ для поперечно й поздовжньо розташованих датчиків.

Експериментально досліджували як відрізняється стан циліндричної частини конструкції паливного бака під час випробувань за повторення циклів заправки/зливу ($r = 1; 2; \dots; 10$).

Метод досліджень. Для підвищення інформативності отриманих результатів, а також виконання якісного візуального аналізу, весь обсяг числових значень зводимо до низки характерних параметрів. Така вибірка експериментальних вимірів як випадкових величин містить безліч інформації. Це її середні арифметичні значення, вибіркові дисперсії, коефіцієнти асиметрії й ексцесу, за якими ухвалюють рішення про існування (чи ні) статистичних закономірностей – симетричність і асиметричність, залежність/незалежність, закон розподілу Гауса. Вони – показники параметричної статистики. Непараметрична статистика – оцінка максимальних і мінімальних значень вибірок вимірів. За їх сумою визначають зрушення, за різницею – розкид (масштаб) і ранг вимірів вибірок [5, 6].

За кожного навантаження $P = 0,196; 0,294; \dots; 1,47 \text{ МПа}$ ($2; 3; \dots; 15 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$) і його повторення $r = 1; 2; \dots; 10$ разів статистичною обробкою тензометричних вимірів $x(i, j)$ і $y(i, j)$ відносної деформації поверхні (у відсотках) на всіх ділянках ($i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3, 4$) оцінюють їх параметри, які містять інформацію про деформації, аналізують та порівнюють. За результатами такого статистичного аналізу можуть ухвалювати рішення про стан деформації конструкції на різних етапах навантаження.

Це випадкові величини з невідомими статистичними закономірностями. За кожного навантаження P при його повторенні r короткі вибірки $n = 12$ вимірів є у вигляді

$$x(11) x(12) x(13) x(14) x(21) x(22) x(23) x(24) x(31) x(32) x(33) x(34) \text{ і} \\ y(11) y(12) y(13) y(14) y(21) y(22) y(23) y(24) y(31) y(32) y(33) y(34).$$

Вважатимемо, що отримані вибірки підпорядковуються нормальному розподілу. Порівняння середніх двох коротких нормально розподілених вибірок випадкових величин з різними дисперсіями відоме як проблема Беренса–Фішера. Точного розв'язку немає. Тому пропонуємо досліджувати модифікований критерій Стюдента, який описуємо формулою

$$t_m = \frac{2(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)}{\Delta x_1 + \Delta x_2},$$

де \bar{x}_1 та \bar{x}_2 – середні значення вибірок вимірів, Δx_1 і Δx_2 – розкиди (масштаби) вибірок.

Порівнюють два середні значення вибірок за однакового тиску P для двох послідовно повторених циклів випробувань заправлення/злив $\bar{x}_1(P(r))$ і $\bar{x}_2(P(r+1))$, $\bar{y}_1(P(r))$ і $\bar{y}_2(P(r+1))$. При $r = 10$ порівнюють $\bar{x}_1(n/P(10))$ і $\bar{y}_1(n/P(10))$ з $\bar{x}_2(n/P(1))$ і $\bar{y}_2(n/P(1))$.

Оцінимо їх середні арифметичні значення:

$$\bar{x}_1(P(r)) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_1(P(r)/k, n); \quad \bar{x}_2(P(r+1)) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_2(P(r+1)/k, n);$$

$$\bar{y}_1(P(r)) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_1(P(r)/k, n); \quad \bar{y}_2(P(r+1)) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_2(P(r+1)/k, n).$$

Масштаби (зрушення) вибірок формуються за їх власними рангами вимірів вибірки [7]:

$$R(x(P(r)/k, n)) = \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x(P(r)/k, n) - x(P(r)/i, n)),$$

$$R(y(P(r)/k, n)) = \sum_{i=1}^n \text{sgn}(y(P(r)/k, n) - y(P(r)/i, n)).$$

Ранги – номери $x(P(r)/k)$ і $y(P(r)/k)$ в упорядкованій вибірці $x^*(P(r)/i)$ і $y^*(P(r)/i)$. Їх максимальні $x^*(P(r)/n)$, $y^*(P(r)/n)$ і мінімальні $x^*(P(r)/1)$, $y^*(P(r)/1)$ значення визначають за формулами

$$x^*(P(r)/n) = x(k) \sum_{k=1}^n \text{sgn}(R(x(k)) - n);$$

$$x^*(P(r)/1) = x(k) \sum_{k=1}^n \text{sgn}(1 - R(x(k)));$$

$$y^*(P(r)/n) = y(k) \sum_{k=1}^n \text{sgn}(R(y(k)) - n);$$

$$y^*(P(r)/1) = y(k) \sum_{k=1}^n \text{sgn}(1 - R(y(k))),$$

де sgn – функції одиничного стрибка, рівного 1, якщо $x \geq \alpha$ і $y \geq \alpha$.

Їх різниця $\Delta \bar{x}_1 = x_1^*(\max) - x_1^*(\min)$, $\Delta \bar{y}_1 = y_1^*(\max) - y_1^*(\min)$ і $\Delta \bar{x}_2 = x_2^*(\max) - x_2^*(\min)$, $\Delta \bar{y}_2 = y_2^*(\max) - y_2^*(\min)$ – це масштаби (розкиди) вимірів (аналогі дисперсій).

Масштаби (розкиди) і зрушення (аналогі середніх значень) визначають за їх максимумами і мінімумами:

$$\begin{aligned}\Delta\bar{x}(P(r)) &= x^*(P(r)/n) - x^*(P(r)/1); \\ \Delta\bar{y}(P(r)) &= y^*(P(r)/n) - y^*(P(r)/1); \\ \overline{x_{mc}}(P(r)) &= 0,5(x^*(P(r)/n) + x^*(P(r)/1)); \\ \overline{y_{mc}}(P(r)) &= 0,5(y^*(P(r)/n) + y^*(P(r)/1)).\end{aligned}$$

Вибірки вважають однорідними із довірчою ймовірністю 0,95, якщо виконується нерівність $|t_m| \leq t_0(n)$, де $t_0(n)$ – порогове значення критерію (для вибірок об'єму $n = 12$, $t_0 = 0,26$ [6, 8]).

Результати та їх обговорення. Зробимо обчислювальний експеримент і перевіряємо гіпотезу, що вибірки $\bar{x}_1(P(r))$ і $\bar{x}_2(P(r+1))$, $\bar{y}_1(P(r))$ і $\bar{y}_2(P(r+1))$ є однорідними. Порівнюємо дві вибірки $\bar{x}_1(n/P(r))$ і $\bar{x}_2(n/P(r+1))$, $\bar{y}_1(n/P(r))$ і $\bar{y}_2(n/P(r+1))$, де $P = 2; 3; \dots; 15 \text{ kg}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$; $r = 1; 2; \dots; 10$. Критерії $t_m(\bar{x}(P(r)))$ і $t_m(\bar{y}(P(r)))$ визначаємо за формулами

$$\begin{aligned}t_m(\bar{x}(P(r))) &= \frac{2(\bar{x}_1(P(r)) - \bar{x}_2(P(r+1)))}{\Delta\bar{x}_1(P(r)) + \Delta\bar{x}_2(P(r+1))}; \\ t_m(\bar{y}(P(r))) &= \frac{2(\bar{y}_1(P(r)) - \bar{y}_2(P(r+1)))}{\Delta\bar{y}_1(P(r)) + \Delta\bar{y}_2(P(r+1))}.\end{aligned}$$

Дотримуючись алгоритму обробки тензометричних результатів, отримали матриці критеріїв (табл. 1) про стан досліджуваного бака.

Для усіх значень в табл. 1 виконується нерівність $t(P(r)) \leq 0,26$, а отже, із довірчою ймовірністю 0,95 можемо стверджувати, що вибірки є однорідними.

Для подальшого аналізу визначимо характерні емпіричні параметри, а саме, середні арифметичні значення критерію $\overline{t_m}(r)$, $\overline{t_m}(P)$; мінімуми й максимуми $t_m(\min(r))$, $t_m(\max(r))$ і $t_m(\min(P))$, $t_m(\max(P))$; їх розкиди (масштаби) $\overline{\Delta t_m}(P)$ і $\overline{\Delta t_m}(r)$; зрушення $\overline{t_{mc}}(P)$ і $\overline{t_{mc}}(r)$. Отримані значення подано в табл. 2 і 3.

Аналіз результатів розрахунків показав, що суцільнокомпонентний паливний бак під час випробувань надлишковим тиском рідкого азоту ефективно сприймає навантаження та деформується без відмінностей як за повторів навантажень, так і зі збільшенням тиску.

Отримані середні значення критеріїв $\overline{t_m}(\bar{P}(\bar{r}))$, $\overline{t_{mc}}(\bar{P}(\bar{r}))$, $\overline{\Delta t_m}(\bar{P}(\bar{r}))$ і $\overline{t_m}(\bar{r}(\bar{P}))$, $\overline{t_{mc}}(\bar{r}(\bar{P}))$, $\overline{\Delta t_m}(\bar{r}(\bar{P}))$ можна розглядати як показники стану бака та використовувати під час аналізу повторних випробувань або дослідження конструкцій, які створюються за однаковою технологією.

Таблиця 1. Модифіковані критерії t_m вибірки $x(k)$ та $y(k)$

| r $P,$ $\text{kg}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$ | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $x(k)$ | | | | | | | | | | |
| 2 | 0,121 | 0,134 | 0,101 | 0,156 | 0,155 | 0,115 | 0,219 | 0,163 | 0,143 | 0,120 |
| 3 | 0,161 | 0,173 | 0,210 | 0,173 | 0,196 | 0,167 | 0,190 | 0,130 | 0,145 | 0,159 |
| 4 | 0,147 | 0,114 | 0,192 | 0,141 | 0,212 | 0,173 | 0,122 | 0,123 | 0,168 | 0,153 |
| 5 | 0,162 | 0,171 | 0,174 | 0,155 | 0,161 | 0,167 | 0,143 | 0,157 | 0,155 | 0,153 |
| 6 | 0,118 | 0,148 | 0,172 | 0,173 | 0,147 | 0,170 | 0,150 | 0,152 | 0,159 | 0,134 |
| 7 | 0,146 | 0,184 | 0,188 | 0,178 | 0,167 | 0,183 | 0,176 | 0,157 | 0,190 | 0,165 |
| 8 | 0,132 | 0,153 | 0,141 | 0,154 | 0,165 | 0,136 | 0,147 | 0,178 | 0,173 | 0,177 |
| 9 | 0,147 | 0,161 | 0,171 | 0,143 | 0,159 | 0,142 | 0,134 | 0,136 | 0,154 | 0,147 |
| 10 | 0,149 | 0,167 | 0,185 | 0,170 | 0,163 | 0,161 | 0,155 | 0,160 | 0,158 | 0,144 |
| 11 | 0,164 | 0,159 | 0,172 | 0,160 | 0,162 | 0,166 | 0,152 | 0,152 | 0,151 | 0,160 |
| 12 | 0,163 | 0,157 | 0,168 | 0,152 | 0,154 | 0,157 | 0,148 | 0,145 | 0,148 | 0,134 |
| 13 | 0,161 | 0,169 | 0,164 | 0,162 | 0,168 | 0,170 | 0,158 | 0,160 | 0,166 | 0,162 |
| 14 | 0,167 | 0,152 | 0,161 | 0,172 | 0,150 | 0,156 | 0,169 | 0,168 | 0,156 | 0,170 |
| 15 | 0,174 | 0,159 | 0,161 | 0,152 | 0,156 | 0,141 | 0,164 | 0,142 | 0,141 | 0,159 |
| $y(k)$ | | | | | | | | | | |
| 2 | 0,207 | 0,209 | 0,203 | 0,209 | 0,206 | 0,202 | 0,206 | 0,205 | 0,203 | 0,205 |
| 3 | 0,205 | 0,202 | 0,206 | 0,201 | 0,207 | 0,207 | 0,205 | 0,207 | 0,207 | 0,204 |
| 4 | 0,201 | 0,204 | 0,207 | 0,201 | 0,205 | 0,202 | 0,209 | 0,207 | 0,201 | 0,203 |
| 5 | 0,202 | 0,201 | 0,205 | 0,205 | 0,209 | 0,207 | 0,202 | 0,204 | 0,205 | 0,206 |
| 6 | 0,203 | 0,206 | 0,203 | 0,202 | 0,207 | 0,206 | 0,201 | 0,203 | 0,209 | 0,201 |
| 7 | 0,201 | 0,203 | 0,207 | 0,201 | 0,205 | 0,205 | 0,202 | 0,205 | 0,207 | 0,202 |
| 8 | 0,205 | 0,202 | 0,204 | 0,205 | 0,204 | 0,205 | 0,203 | 0,204 | 0,205 | 0,207 |
| 9 | 0,206 | 0,203 | 0,203 | 0,201 | 0,203 | 0,207 | 0,202 | 0,206 | 0,205 | 0,209 |
| 10 | 0,207 | 0,206 | 0,200 | 0,205 | 0,203 | 0,207 | 0,203 | 0,201 | 0,209 | 0,203 |
| 11 | 0,205 | 0,202 | 0,206 | 0,203 | 0,204 | 0,205 | 0,201 | 0,205 | 0,209 | 0,203 |
| 12 | 0,204 | 0,206 | 0,203 | 0,203 | 0,203 | 0,202 | 0,206 | 0,202 | 0,204 | 0,203 |
| 13 | 0,201 | 0,203 | 0,204 | 0,202 | 0,200 | 0,203 | 0,202 | 0,205 | 0,204 | 0,203 |
| 14 | 0,207 | 0,204 | 0,202 | 0,202 | 0,203 | 0,204 | 0,200 | 0,201 | 0,200 | 0,204 |
| 15 | 0,201 | 0,206 | 0,203 | 0,200 | 0,197 | 0,202 | 0,207 | 0,201 | 0,206 | 0,202 |

Таблиця 2. Характерні емпіричні параметри бака $\bar{t}_m(\bar{r}(\bar{P}))$

| r | $t_m(x)$ | | | | | $t_m(y)$ | | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|----------------|
| | \bar{t}_m | $t_m(\min)$ | $t_m(\max)$ | Δt_m | \bar{t}_{mc} | \bar{t}_m | $t_m(\min)$ | $t_m(\max)$ | Δt_m | \bar{t}_{mc} |
| 1 | 0,151 | 0,118 | 0,174 | 0,056 | 0,146 | 0,204 | 0,201 | 0,207 | 0,006 | 0,204 |
| 2 | 0,157 | 0,114 | 0,184 | 0,070 | 0,149 | 0,204 | 0,201 | 0,209 | 0,008 | 0,205 |
| 3 | 0,169 | 0,101 | 0,210 | 0,109 | 0,156 | 0,204 | 0,200 | 0,207 | 0,007 | 0,204 |
| 4 | 0,160 | 0,141 | 0,178 | 0,037 | 0,160 | 0,203 | 0,200 | 0,209 | 0,009 | 0,205 |
| 5 | 0,165 | 0,147 | 0,212 | 0,065 | 0,180 | 0,204 | 0,197 | 0,209 | 0,012 | 0,203 |
| 6 | 0,157 | 0,115 | 0,183 | 0,068 | 0,149 | 0,205 | 0,202 | 0,207 | 0,005 | 0,205 |
| 7 | 0,159 | 0,122 | 0,219 | 0,097 | 0,171 | 0,204 | 0,200 | 0,209 | 0,009 | 0,205 |
| 8 | 0,152 | 0,123 | 0,178 | 0,055 | 0,151 | 0,204 | 0,201 | 0,207 | 0,006 | 0,204 |
| 9 | 0,158 | 0,141 | 0,190 | 0,049 | 0,166 | 0,205 | 0,200 | 0,209 | 0,009 | 0,205 |
| 10 | 0,153 | 0,120 | 0,177 | 0,057 | 0,149 | 0,204 | 0,201 | 0,209 | 0,008 | 0,205 |
| $\bar{t}(\bar{r}(\bar{P}))$ | 0,158 | 0,124 | 0,191 | 0,066 | 0,158 | 0,204 | 0,200 | 0,208 | 0,008 | 0,204 |

Таблиця 3. Характерні емпіричні параметри бака $\bar{t}_m(\bar{P}(\bar{r}))$

| P, kg·s/cm ² | $t_m(x)$ | | | | | $t_m(y)$ | | | | |
|-----------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|----------------|
| | \bar{t}_m | $t_m(\min)$ | $t_m(\max)$ | Δt_m | \bar{t}_{mc} | \bar{t}_m | $t_m(\min)$ | $t_m(\max)$ | Δt_m | \bar{t}_{mc} |
| 2 | 0,143 | 0,101 | 0,219 | 0,118 | 0,160 | 0,206 | 0,202 | 0,209 | 0,007 | 0,206 |
| 3 | 0,170 | 0,130 | 0,210 | 0,080 | 0,170 | 0,205 | 0,201 | 0,207 | 0,006 | 0,204 |
| 4 | 0,155 | 0,114 | 0,212 | 0,098 | 0,163 | 0,204 | 0,201 | 0,209 | 0,008 | 0,205 |
| 5 | 0,160 | 0,143 | 0,174 | 0,031 | 0,159 | 0,205 | 0,201 | 0,209 | 0,008 | 0,205 |
| 6 | 0,152 | 0,118 | 0,173 | 0,055 | 0,146 | 0,204 | 0,201 | 0,209 | 0,008 | 0,205 |
| 7 | 0,173 | 0,146 | 0,190 | 0,044 | 0,168 | 0,204 | 0,201 | 0,207 | 0,006 | 0,204 |
| 8 | 0,156 | 0,132 | 0,178 | 0,046 | 0,155 | 0,204 | 0,202 | 0,207 | 0,005 | 0,205 |
| 9 | 0,150 | 0,134 | 0,171 | 0,037 | 0,153 | 0,205 | 0,201 | 0,209 | 0,008 | 0,205 |
| 10 | 0,061 | 0,144 | 0,185 | 0,041 | 0,165 | 0,204 | 0,200 | 0,209 | 0,009 | 0,205 |
| 11 | 0,160 | 0,151 | 0,172 | 0,021 | 0,162 | 0,204 | 0,201 | 0,209 | 0,008 | 0,205 |
| 12 | 0,153 | 0,134 | 0,168 | 0,034 | 0,151 | 0,204 | 0,202 | 0,206 | 0,004 | 0,204 |
| 13 | 0,164 | 0,158 | 0,170 | 0,012 | 0,164 | 0,203 | 0,200 | 0,205 | 0,005 | 0,203 |
| 14 | 0,162 | 0,150 | 0,172 | 0,022 | 0,161 | 0,203 | 0,200 | 0,207 | 0,007 | 0,204 |
| 15 | 0,155 | 0,141 | 0,174 | 0,033 | 0,158 | 0,203 | 0,197 | 0,207 | 0,010 | 0,202 |
| $\bar{t}(\bar{P}(\bar{r}))$ | 0,151 | 0,135 | 0,183 | 0,048 | 0,159 | 0,204 | 0,201 | 0,208 | 0,007 | 0,204 |

ВИСНОВКИ

Розробили технологію випробувань на міцність суцільнокомпонітних паливних баків в умовах впливу криогенних температур. Оцінили пружно-деформований стан за повторних навантажень, які моделюють заправлення/злив, викорис-

товуючи вибірки тензометричних результатів. Вони містять інформацію про стан паливних баків. Це короткі вибірки ($n < 20$). Запропоновано алгоритм їх статистичної обробки зі застосуванням модифікованого критерію Стьюдента як показника стану бака. Вперше для контролю стану тонкостінних силових оболонок з вуглепластику запропоновано й реалізовано аналітичну технологію обробки та оцінки стану конструкції під час випробувань надлишковим тиском рідкого азоту. Отримано оцінки модифікованого критерію Стьюдента дослідного бака, за якими (з імовірністю 0,95) ухвалено рішення про його нормальний стан.

1. *Проектирование и конструирование изделий из композиционных материалов. Теория и практика: учебник* / П. М. Гагауз, Ф. М. Гагауз, Я. С. Карпов, С. П. Кривенда. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского, 2015. – 672 с.
2. *Карпов Я. С.* Проектирование деталей и агрегатов из композитов: учебник. – Х.: Нац. аэрокосмич. ун-т “Харьк. авиац. ин-т”, 2010. – 768 с.
3. *Манько Т. А., Лимот О. В.* Створення надтонких структур силових оболонок паливних баків із вуглепластику // Матеріали III Міжн. конф. “Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід”. – Амстердам, 2019. – С. 274–277.
4. *Ceramics based on reaction-bonded boron carbide for heat protection coatings of space aircraft* / I. O. Husarova, Y. V. Solodkyi, T. A. Manko, and P. I. Loboda // *Materials Science*. – 2023. – **58**, № 6. – P. 740–747. DOI:10.1007/s11003-023-00724-z
5. *Sharon A. Shrock and William C. Coscarell.* Criterion-referenced Test Development: Technical and Legal Guidelines for Corporate Training. – Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1989. – 220 p.
6. *Chakravarti I. M., Laha R. G., and Roy J.* Handbook of Methods of Applied Statistics, V. I: Techniques of Computation Descriptive Methods, and Statistical Inference. – New York: John Wiley and Sons, 1967. – P. 392–394.
7. *Оуэн Д. Б.* Сборник статистических таблиц. – М.: АН СССР, 1966. – 586 с.
8. *Гаек Я., Шидик З.* Теория ранговых критериев. – М.: Наука, 1971. – 376 с.

Одержано 30.04.2024