

УДК 620.165.29.05

О.Г. Забірний, О.Т.Кудреватих, Н.О. Куїнн

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара*

## **ПРИСТРІЙ ДЛЯ ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ПАЛИВНИХ БАКІВ РІДИННИХ РАКЕТНИХ ДВИГУНІВ**

Розроблена конструкція пристрою, призначеного для експрес-контролю герметичності паливних баків рідинних ракетних двигунів методом кореляційної спекл-інтерферометрії. Здійснено моделювання вигину сенсорної мембрани, за результатами якого визначено, що чутливість пристрою є порівняною із чутливістю мас-спектрометричних пристроїв пошуку течі.

*Ключові слова:* контроль герметичності, паливний бак, спекл-інтерферометрія, кореляція зображень.

Разработана конструкция устройства, предназначенного для экспресс-контроля герметичности топливных баков жидкостных ракетных двигателей методом корреляционной спекл-интерферометрии. Проведено моделирование изгиба сенсорной мембраны, в результате которого установлено, что чувствительность устройства сравнима с чувствительностью масс-спектрометрических теческательей.

*Ключевые слова:* контроль герметичности, топливный бак, спекл-интерферометрия, корреляция изображений.

The design of a leak detector for express control of the fuel tank for liquid propellant rocket engine based on correlation speckle interferometry has been developed. Computer simulation of the sensor membrane shows that the sensitivity of the device is comparable to that of mass spectrometric leak detectors.

*Keywords:* leak detector, fuel tank, speckle interferometry, image correlation.

**Вступ.** Герметичність паливних баків значною мірою відповідає за надійність ракетно-космічної техніки. Наявність витoku компонентів рідинного палива являє собою загрозу на етапі пуску ракети, а також в умовах транспортування та зберігання і підготовки до пуску на стартовому комплексі. Таким чином, актуальною є задача створення надійних методів і пристроїв для контролю герметичності паливних баків.

**Аналіз існуючих рішень.** Існуючі методи контролю герметичності класифікуються за різними ознаками. По-перше, існує класифікація за типом пробної речовини, яка використовується для контролю герметичності – рідина або газова суміш. Інший підхід до класифікації методів контролю герметичності викладений у звіті з експерименту LASRE NASA [1]. Згідно цього підходу методи контролю герметичності можна поділити на дві основні групи – системні та локальні (табл.1). Методи, що відносяться до першої групи, дозволяють визначити наявність порушення герметичності і оцінити ступінь

негерметичності за обсягом і швидкістю витікання пробної речовини. Методи другої групи дозволяють локалізувати ділянку, яка спричинює порушення герметичності, але не завжди дозволяють кількісно оцінити ступінь негерметичності.

Таблиця 1

**Основні методи контролю герметичності**

| Метод                                                 | Суть методу                                                                                                                                                                                                                               | Найменша величина течі мбар·л/с |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Системні методи – визначення сумарної негерметичності |                                                                                                                                                                                                                                           |                                 |
| Манометричний                                         | Реєстрація зміни тиску у випробувальній системі внаслідок течі                                                                                                                                                                            | $10^{-2}$                       |
| Вакууметричний                                        | Реєстрація зміни тиску або складу газового середовища у вакуумній камері внаслідок натікання                                                                                                                                              | $10^{-2}$                       |
| Локальні – визначення місця течі                      |                                                                                                                                                                                                                                           |                                 |
| Гідростатичні випробування                            | Створення тиску рідини (води) в порожнині об'єкта контролю                                                                                                                                                                                | $10^{-3} - 10^{-5}$             |
| Катарометричний                                       | Виявлення речовин, що витікають внаслідок порушення герметичності, за їх різницею теплопровідності                                                                                                                                        | $10^{-3} - 10^{-5}$             |
| Хімічний                                              | Реєстрація пробних речовин, що проникають через течі, за наявністю ефекту хімічних реакцій із індикаторною речовиною                                                                                                                      | $10^{-2} - 10^{-3}$             |
| Газова хроматографія                                  | Виявлення витоку пробної речовини за результатами спектрального аналізу середовища                                                                                                                                                        | $10^{-4}$                       |
| Пухирковий метод                                      | Виявлення пухирів пробного газу, що проникає через течі при зануренні об'єкта контролю у рідину або покритті його плівкою, здатною створювати бульбашки                                                                                   | $10^{-3} - 10^{-4}$             |
| Акустичний (ультразвуковий)                           | Пошук акустичних хвиль, що збуджуються у середовищі внаслідок витікання пробних речовин через течі                                                                                                                                        | $10^{-2}$                       |
| Галогенний                                            | Пошук проникнення через течі пробної речовини за збільшенням емісії іонів з металевої поверхні при потраплянні на неї галогену                                                                                                            | $10^{-7}$                       |
| Радіоізотопний метод                                  | Об'єкти контролю протягом деякого часу витримуються в атмосфері радіоактивного газу. Після видалення радіоактивного газу й ретельного очищення поверхні від радіоактивних забруднень випромінюючими залишаються лише негерметичні об'єкти | $10^{-9} - 10^{-12}$            |
| Газоаналітичний                                       | Реєстрація наявності індикаторних речовин (газів або парів рідин), що проникають крізь ділянки порушення                                                                                                                                  | $10^{-7}$                       |

|                      |                                                                                                                                      |               |
|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| метод                | герметичності                                                                                                                        |               |
| Мас-спектрометричний | Виділення та реєстрація пробної речовини, що проникає через течі, шляхом розділення іонів різних газів за співвідношенням маса/заряд | до $10^{-12}$ |

Слід відзначити, що найбільш поширеним методом контролю герметичності паливних баків в авіаційній та ракетно-космічній галузі є мас-спектрометричний метод із застосуванням у якості пробної речовини гелію. Це пояснюється високою чутливістю методу, а також властивостями гелію – його хімічною інертністю, нетоксичністю, вибухобезпечністю, низькою концентрацією у повітрі (приблизно  $5 \cdot 10^{-4} \%$ ).

Основні проблеми при використанні мас-спектрометричного методу – висока вартість обладнання, складність і високі вимоги до точності процедури калібрування обладнання, залежність часу відгуку детектора течі від способу підключення мас-спектрометра до системи навантаження об'єкта, об'єму об'єкта контролю та швидкості подачі тиску, поступове зменшення чутливості обладнання внаслідок накопичення пробної речовини в компонентах обладнання. Крім того, слід відзначити, що оскільки цей метод є локальним, то існує можливість того, що величина локальної течі знаходиться у допустимих межах, але сумарна ступінь негерметичності при цьому є вищою за допустиму [2].

Активний розвиток обчислювальної техніки та цифрових пристроїв реєстрації зображення обумовив підвищений інтерес до впровадження оптичних методів контролю у виробництві високотехнологічних об'єктів авіаційної та ракетно-космічної техніки. Особливо активно розвиваються на даний час оптичні методи високої роздільної здатності – широкографія, голографічна та спекл-інтерферометрія, метод цифрової кореляції зображень. Аналіз літературних джерел показує, що дані методи можуть використовуватися також для контролю якості виготовлення та герметичності баків [3, 4].

У роботі [4] представлений мембранний манометр, який складається із двох основних блоків – випробувальної камери з сенсорною мембраною і спекл-інтерферометра, який забезпечує реєстрацію зображення сенсорної мембрани протягом часу контролю. Визначення ступеню герметичності здійснюється методом електронної спекл-інтерферометрії. Показано, що при застосуванні мембрани із високопружного матеріалу (модулі пружності  $E = 2,1$  МПа) товщиною 0,05 мм можна за допомогою методу електронної спекл-інтерферометрії визначати падіння тиску внаслідок порушення герметичності до  $10^{-9}$  Па.

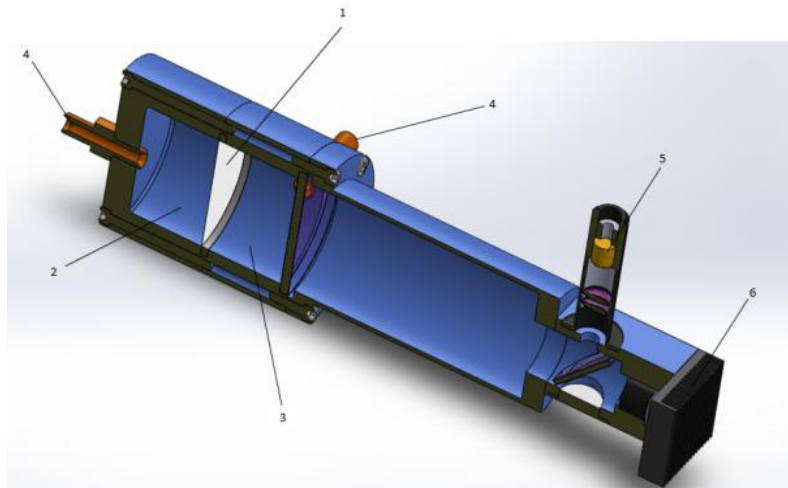
Метод електронної спекл-інтерферометрії передбачає отримання цифрових зображень поверхні об'єкта контролю у двох різних станах, які відрізняються величиною навантаження на об'єкт контролю, при цьому для кожного стану об'єкта необхідно зробити декілька знімків, які будуть

відрізнятися один від одного фазовим зсувом опорного променя. Такий фазовий зсув забезпечується використанням високоточного механізму керування дзеркалом системи формування опорного променя спекл-інтерферометра, що обумовлює його високу вартість. Слід зазначити, що за наявності високого ступеню негерметичності деформація сенсорної мембрани у проміжки часу між здійсненням фазового зсуву опорного променя буде призводити до зменшення точності і достовірності результатів контролю. Крім того, розміщення сенсорного елементу та цифрового реєстратора зображення у окремих компонентах призводить до виникнення похибок вимірювань, обумовлених порушенням стабільності умов реєстрації зображення як то зміни загальної освітленості, наявність вібрацій та температурних флуктуацій у навколишньому середовищі.

**Задача роботи** – зменшення чутливості пристрою для експрес-контролю герметичності на основі методу спекл-інтерферометрії до впливу негативних факторів.

**Матеріали і методи.** Для реалізації поставленої мети запропоновано використати метод кореляційної спекл-інтерферометрії. Моделювання конструкції та роботи пристрою здійснювалося в середовищі Simulation SolidWorks.

**Результати дослідження.** Для усунення впливу негативних факторів запропонована нова конструкція пристрою для експрес-контролю герметичності на основі методу кореляційної спекл-інтерферометрії (рис.1).

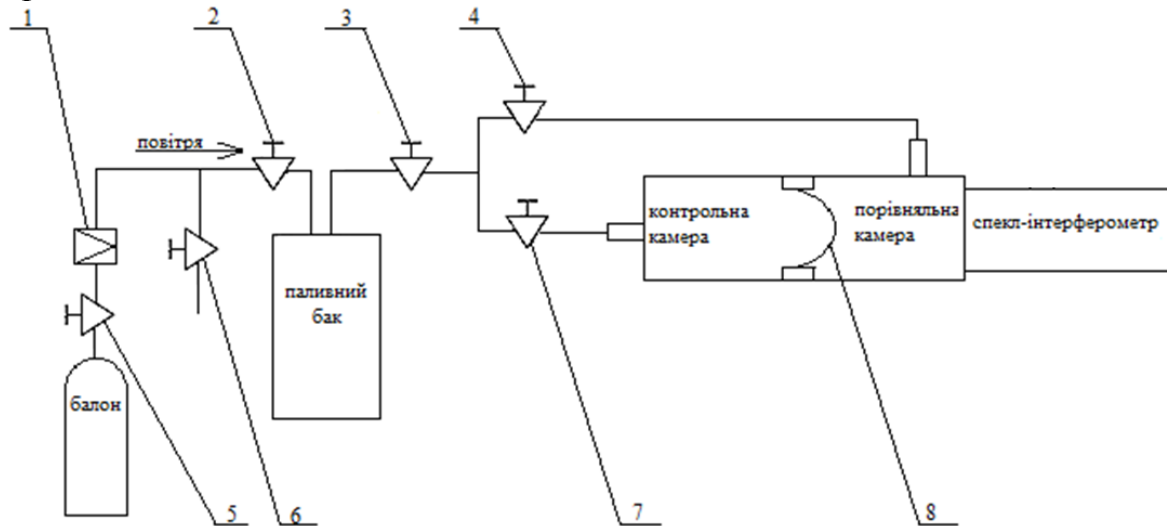


**Рис. 1. Загальний вигляд пристрою для експрес-контролю герметичності паливних баків:**

- 1 - сенсорна мембрана; 2 – контрольна камера; 3 – камера порівняння; 4 – штуцери підключення до пневмосистеми навантаження; 5 – джерело лазерного випромінювання; 6 – цифровий реєстратор зображення

Основний сенсорний елемент пристрою – мембрана 1 із еластичного матеріалу з високим модулем пружності – розміщується в герметичному корпусі пристрою і являє собою одночасно перетин між двома камерами – контрольною 2 і камерою порівняння 3. Обидві камери через штуцери 4

підключені до пневмосистеми для експрес-контролю герметичності баку (рис.2). Вхід контрольної камери 2 залишається відчиненим в ході випробувань, а вхід камери порівняння 3 зачиняється до початку випробувань. Сенсорна мембрана 1 освітлюється за допомогою джерела лазерного випромінювання 5. Цифровий реєстратор зображення 6 підключається до пристрою обробки інформації.



**Рис. 2. Схема пневмосистеми для експрес-контролю герметичності баку:**

1 – редуктор; 2,3,4,5,7 - клапани; 6 - дренаж; 8 - сенсорна мембрана

Перед початком випробувань на герметичність паливний бак, а також контрольна та порівняльна камери заповнюються надлишковим тиском згідно технічних умов випробувань. В такому стані здійснюється реєстрація спекл-зображення початкового стану сенсорної мембрани.

Після цього клапан входу камери порівняння перекривається і здійснюється відеозапис стану сенсорної мембрани, освітленої когерентним (лазерним) випромінюванням. Контроль герметичності паливного баку відбувається шляхом порівняння у реальному часі вихідного та поточного цифрових зображень сенсорної мембрани. За наявності течі тиск у контрольній камері змінюється, що призводить до деформування сенсорної мембрани, а саме її вигину.

Величина максимального вигину мембрани манометра визначається наступним чином:

$$w = \frac{(P_k - P_0)R^4}{64D}, \quad (1)$$

де  $D = \frac{Eh^2}{12(1-\sigma^2)}$  – циліндрична жорсткість мембрани,

$P_k, P_0$  – поточне та початкове значення тиску відповідно,

$E, \sigma$  – модулі пружності першого та другого роду матеріалу мембрани,

$R$  – радіус мембрани,

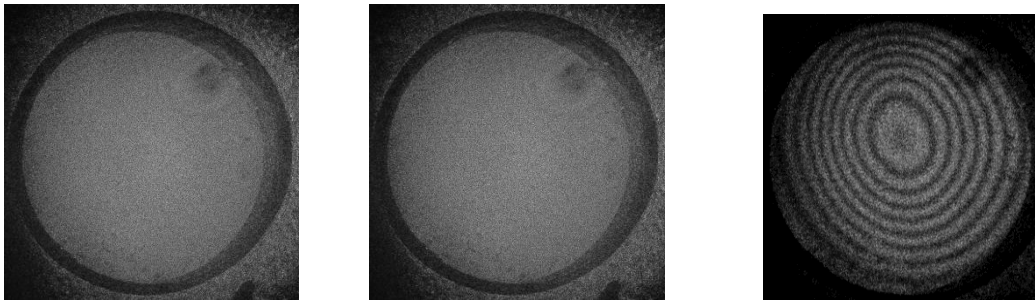
$h$  – товщина мембрани.

При цьому зміна тиску  $(P_k - P_0)$  у обсязі  $V$  об'єкта контролю за час спостереження  $t$  характеризує величину інтенсивності течі  $Q$ :

$$Q = \frac{V(P_k - P_0)}{t} = \frac{64VD}{tR^4} w = kV \frac{w}{t}, \quad (2)$$

де  $k$  – коефіцієнт, що залежить від фізико-механічних характеристик матеріалу мембрани.

Для реєстрації вигину сенсорної мембрани пропонується використати метод кореляційної спекл-інтерферометрії. Вигин мембрани призводить до зміни розподілу яркості спеклів в площині цифрового зображення. Якщо здійснити порівняння зображень шляхом визначення попіксельної різниці інтенсивностей зображення, що відповідає поточному стану мембрани, і зображення початкового (вихідного) стану мембрани, то отримаємо різницеве зображення з полосами, що визначають ступінь корельованості зображень (рис.3).



**Рис. 3. Результат порівняння спеклограм поточного стану сенсорної мембрани із початковим (різницеве зображення)**

При цьому кількість світлих смуг на різницевому зображенні пов'язана з деформацією (вигином) мембрани:

$$w(1 + \cos\gamma) = m\lambda, \quad (3)$$

де  $m=1,2,\dots,N$  – кількість світлих смуг на зображенні,  $\lambda$  – довжина хвилі лазерного випромінювання,  $\gamma$  – кут падіння лазерного променя на поверхню мембрани [5].

Враховуючи, що у даному пристрої  $\gamma=0$  інтенсивність течі можна визначити за кількістю смуг, отриманих на різницевому зображенні сенсорної мембрани, наступним чином:

$$Q = k V m \frac{\lambda}{2t}. \quad (4)$$



Шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі Simulation SolidWorks отримано модель деформування сенсорної мембрани, виготовленої із натурального каучуку (товщина мембрани 0,05 мм, радіус 35 мм). За результатом моделювання різниця тиску в контрольній та порівняльній камерах  $P_k - P_0 = 1,67 \cdot 10^{-7}$  Па призводить до вигину мембрани на 0,993 мкм (рис.4). При цьому на різницевому зображенні мембрани спостерігається 3 світлих смуги. Розрахунок показує, що така зміна тиску відбудеться за 2 хвилини для циліндричного баку обсягом  $35 \text{ м}^3$  за наявності течії величиною  $5 \cdot 10^{-7}$  мбар·л/с. Таким чином, чутливість розробленого пристрою для експрес-контролю герметичності паливного баку рідинного ракетного двигуна досягає чутливості мас-спектрометричного методу при суттєвому скороченні витрат на проведення контролю та часу випробувань.

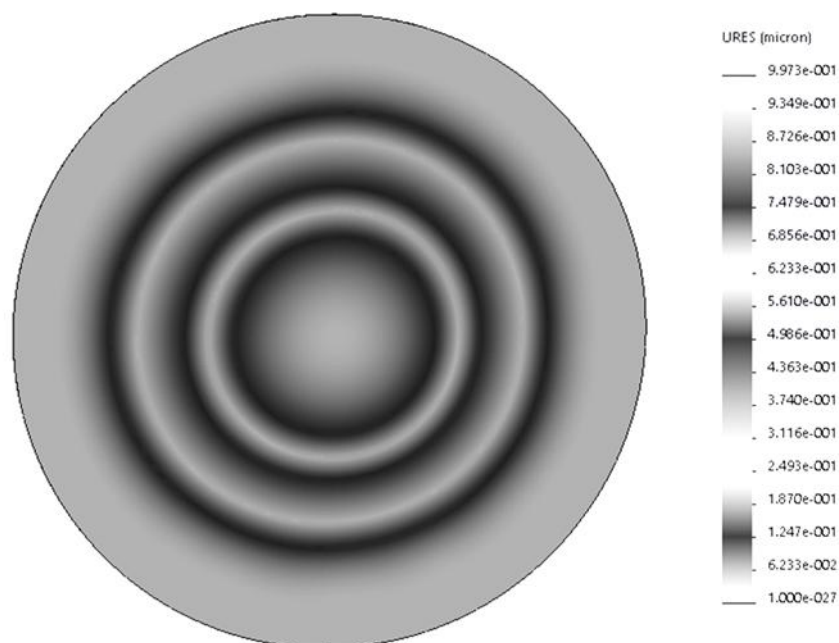


Рис. 4. Модель різницевого зображення для  $P_k - P_0 = 1,67 \cdot 10^{-7}$  Па

**Висновки.** В ході досліджень підтверджена можливість проведення експрес-контролю герметичності паливних баків рідинних ракетних двигунів із використанням методу кореляційної спекл-інтерферометрії. Розроблена модель спекл-інтерферометра для реалізації даного методу характеризується високою чутливістю та захищеністю від впливу зовнішніх факторів. В подальшому передбачається дослідити вплив температурних змін на метрологічні характеристики даного пристрою, а також вдосконалити програмне забезпечення пристрою з метою повної автоматизації процесу контролю.

### Бібліографічні посилання

1. Neal Hass, Masashi Mizukami, Bradford A.Neal, Clinton St. John, Robert J Beil, Timothy P.Griffin Propellant Feed System Leak Detection – Lessons Learned

From the Linear, Aerospike SR-71 Experiment (LASRE) // NASA – Nov.1999. – 37 P.

2. Rottlander H., Umrath W., Voss G. Fundamentals of leak detection / H.Rottlander, W.Umrath, G.Voss // Leybold GmbH – 2016. – 49 PP. Режим доступу:

[https://www.leyboldproducts.com/media/pdf/90/c7/87/Fundamentals\\_of\\_Leak\\_Detection\\_EN.pdf](https://www.leyboldproducts.com/media/pdf/90/c7/87/Fundamentals_of_Leak_Detection_EN.pdf) (Дата звернення 05.04.2019)

3. Pagliarulo V., Bianco V., Memmolo P., Distantе C., Ruggiero B., Ferraro P. Leaks detection in stainless steel kegs via ESPI / V. Pagliarulo, V. Bianco, P. Memmolo, C. Distantе, B. Ruggiero, P.Ferraro // Optics and Lasers in Engineering – Volume 110, November 2018. – P.P. 220-227. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.06.007  
Режим доступу:

[https://www.researchgate.net/publication/325995211\\_Leaks\\_detection\\_in\\_stainless\\_steel\\_kegs\\_via\\_ESPI](https://www.researchgate.net/publication/325995211_Leaks_detection_in_stainless_steel_kegs_via_ESPI) (Дата звернення 05.04.2019)

4. Сохач Ю.В., Кудрєватих О.Т., Рожковський В.Ф., Аліньков О.Л. Патент України 41632 МПК 2009 G01L 7/00 Мембранний манометр вимірювання малого тиску / Ю.В. Сохач, О.Т. Кудрєватих, В.Ф. Рожковський, О.Л.Аліньков // Заявл. 16.02.2009. Заявка № u200901241. Опубл. 25.05.2009, бюл.№10.

5. Горбатенко Б.Б., Рябухо В.П., Гребенюк А.А., Мысина Н.Ю., Максимова Л.А. Контроль микроперемещений методами цифровой голографической и спекл-интерферометрии/ Б.Б.Горбатенко, В.П.Рябухо, А.А.Гребенюк, Н.Ю.Мысина, Л.А.Максимова // Вестник Саратовского государственного технического университета. – т.4, №1(49), 2010. – с.14-24. Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/v/kontrol-mikroperemescheniy-metodami-tsifrovoy-golograficheskoy-i-spekl-interferometrii> (Дата звернення 05.04.2019)

*Надійшла до редколегії 24.09.2019*