

УДК 629.78.036.5.063.6:532.631

doi: 10.32620/aktt.2023.6.07

О. М. МІНАЙ

ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ КАПІЛЯРНОЇ УТРИМНОЇ ЗДАТНОСТІ СІТЧАСТИХ РОЗДІЛЮВАЧІВ ФАЗ

Предметом вивчення в статті є процес втрати капілярної утримної здатності (КУЗ), в наслідок порушення рівноваги зовнішніх та внутрішніх сил на поверхні розділу фаз (ПРФ) «рідина – газ» капіляру в чарунці сітчастого розділювача фаз (СРФ) капілярних засобів забезпечення суцільності палива (КЗСП) з тривалим терміном експлуатації у хімічно агресивних компонентах палива (КП): азотному тетроксиді (АТ) та несиметричному диметилгідразині (НДМГ). **Метою** є удосконалення вибору проектних параметрів КЗСП за рахунок уточнення традиційних підходів до розрахунку КУЗ СРФ в залежності від терміну їх експлуатації. **Завдання:** визначити швидкість корозії основного конструкційного матеріалу СРФ – сталевих сіток саржевого типу переплетіння, та її вплив на структурні і геометричні характеристики сіток; провести експериментальне визначення зміни КУЗ СРФ; удосконалити математичну модель визначення КУЗ СРФ, враховуючи термін їх експлуатації у складі паливної системи космічних літальних апаратів (КЛА). Використаними **методами** є: для визначення швидкості корозії – металографічні дослідження та вимірювання геометричних розмірів зразків сіток; для визначення зміни КУЗ – бульбашковий метод. **Отримані такі результати.** Визначено коефіцієнт максимальної швидкості корозії. Отримано нову, уточнену залежність осередненого значення $Vo_{кр}$ від температури КП. Отримано лінійні регресії зміни апроксимованих значень КУЗ СРФ в залежності від терміну їх експлуатації. Визначено збільшення середнє арифметичного значення контактного куту змочування θ в НДМГ за 31 рік експлуатації СРФ. Отримано удосконалену математичну модель визначення КУЗ СРФ, з урахуванням терміну їх експлуатації в АТ та НДМГ. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: вперше проведені всебічні дослідження по визначенню швидкості корозії основного конструкційного матеріалу СРФ після тривалого терміну їх перебування (від 14 до 31 року) в КП (АТ та НДМГ) і під їх парами, за результатами яких виявлені закономірності протікання корозійних процесів в рідкій і газовій фазі, встановлені швидкості корозії і виведені коефіцієнти, застосування яких вдосконалює інженерні методики розрахунків основних параметрів СРФ; отримала подальший розвиток фізична модель розрахунку $Vo_{кр}$; удосконалено фізичну модель розрахунку КУЗ, що дозволяє з більшою точністю, ніж це було раніше, розрахувати значення статичної КУЗ СРФ та зробити більш досконалою й надійною кінцеву конструкцію КЗСП, що проектується.

Ключові слова: космічний літальний апарат; мікрогравітація; засіб забезпечення суцільності палива; сітчастий розподільювач фаз; корозія; контактний кут змочування; капілярна утримна здатність; мікроструктура; двигун; багаторазові космічні системи.

Вступ

Для кінцевого вибору конструкційного матеріалу, типу плетіння та геометричних характеристик СРФ при проектуванні КЗСП, необхідне експериментальне вимірювання їх КУЗ. Нехтування цим і використання лише даних наведених в довідковій літературі (емпіричних значень КУЗ засвоєних промисловістю сіток), може призвести до небажаного результату. Оскільки неточності, що допускаються технічною документацією при виготовленні проволони сіток оказують значний вплив на значення еквівалентного капілярного діаметру (ЕКД) пор, тонкість фільтрації і коефіцієнтів гідравлічного опору. Розкид опитних значень останніх, котрі були отримані різними авторами, досягає +/- 60 % [1]. Експериментальне вимірювання КУЗ потрібно і при отриманні дозволу на подовження терміну експлуатації, чи

повторного використання у складі багаторазових космічних систем КЗСП. Оскільки, забруднення та деформація матеріалу сіток під час їх виготовлення, транспортування та зберігання, забруднення під час виготовлення з сіток елементів СРФ та їх подальшого монтування до паливної системи КЛА, її заправки КП і подальшої експлуатації в складі КЛА, під час якої, можливо, утворення на поверхні дроту СРФ: плівок, гелів, опадів внаслідок хімічного розпаду КП та корозійних процесів. Все це може вплинути на геометричні параметри чарунок сітки, змінити значення контактного куту змочування і, таким чином, сприяти критичному зменшенню КУЗ СРФ КЗСП [1].

В статті автором наведено результати визначення швидкості корозії та зміни КУЗ СРФ, в наслідок їх тривалого терміну експлуатації (від 14 до 31 року) у хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) КЛА,

які мають за потребу необхідність багаторазового запуску двигуна в умовах невагомості (мікрогравітації).

Постановка задачі дослідження

Для досягнення основної мети дослідження – удосконалення вибору проектних параметрів КЗЗСП за рахунок уточнення традиційних підходів до розрахунку КУЗ СРФ, в залежності від терміну їх експлуатації у складі паливної системи КЛА, двигун яких працює на висококиплячих КП (АТ та НДМГ), були сформульовані наступні задачі [2, 3]:

- визначити швидкість корозії основного конструкційного матеріалу СРФ – сталевих сіток саржевого типу переплетіння (марка сталі 12Х18Н10Т) та її вплив на структурні та геометричні характеристики сіток в залежності від терміну їх експлуатації;
- провести експериментальне дослідження зміни КУЗ СРФ КЗЗСП;
- за результатами фізичного експерименту визначити фактори, що впливають на зміну КУЗ СРФ КЗЗСП.

Визначення швидкості корозії основного конструкційного матеріалу СРФ проводилось за допомогою металографічних досліджень та вимірювання геометричних розмірів зразків сіток оптичним методом.

Визначення КУЗ СРФ КЗЗСП проводилось за допомогою фізичного експерименту – бульбашкового методу [4, 5], з використанням методики планування експерименту та обробки результатів вимірювань і визначення їх похибок, що забезпечило: достовірність отриманих результатів, досягнення мети і вирішення поставлених задач [2, 3].

Визначення швидкості корозії

Визначення швидкості корозії основного конструкційного матеріалу СРФ КЗЗСП – сталевих сіток, що були демонтовані з баків АТ та НДМГ розгінного ступеню РН «Дніпро» проводилось у ДП «КБ «Південне» в період з 1997 по 2016 роки.

Об'єктом дослідження були СРФ, які уявляють з себе сітки №008 саржевого типу плетіння з квадратними чарунками у світлі [6], що тривалий термін (від 14 до 31 року) перебували під впливом хімічно агресивних КП (АТ та НДМГ) і під їх парами.

На рисунку 1 наведено конструктивну схему КЗЗСП баків АТ та НДМГ розгінного ступеню РН «Дніпро». На рисунку 2 наведено схематичне зображення саржевого типу плетіння дротяної тканини з квадратними чарунками у світлі.

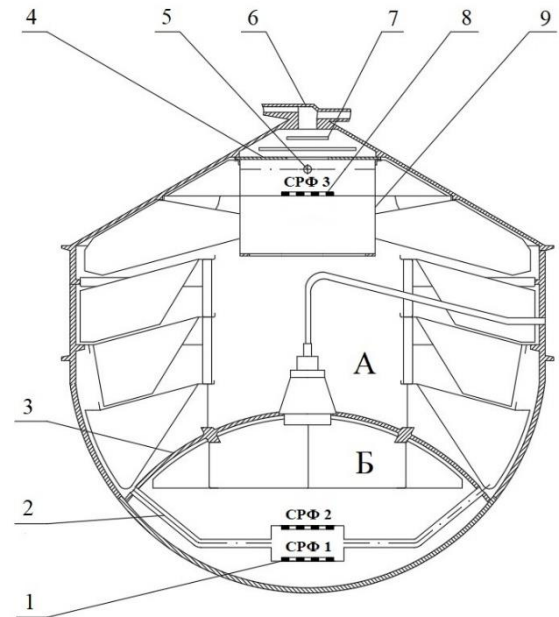


Рис. 1. Конструктивна схема КЗЗСП баків АТ та НДМГ розгінного ступеню РН «Дніпро»:
1 – накопичувач КЗЗСП; 2 – трубопроводи;
3 – проміжне днище; 4 – пластина; 5 – отвори;
6 – витратна магістраль; 7 – тарель забірної пристрою;
8 – СРФ забірної пристрою;
9 – забірний пристрій КЗЗСП; А – основна порожнина бака; В – проміжна порожнина бака;
СРФ 1, 2 – сітка №008;
СРФ 3 – пакет сіток №008 і №08

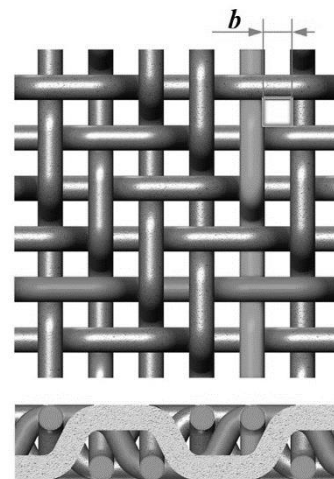


Рис. 2. Схематичне зображення саржевого типу плетіння дротяної тканини з квадратними чарунками у світлі: b – розмір чарунки у світлі

Сітки №008 має згідно з технічними умовами (ТУ) наступні характеристики: діаметр дроту 55^{+4}_{-3} мкм; номінальний розмір чарунки у світлі 80 мкм; припустиме відхилення середнього арифме-

тичного розміру чарунки $\pm 13\%$; допустиме відхилення розміру окремої чарунки $+75\%$; припустиме відхилення розміру особливо великих чарунок $50\ldots 70\%$; допустима кількість особливо великих чарунок не більше 9% на сітці з площею 1 м^2 [3, 6].

Для визначення швидкості корозії були проведені наступні роботи:

- аналіз хімічного складу речовин, що знаходяться на поверхні зразків сіток СРФ [7];
- аналіз впливу різноманітних факторів на швидкість корозії [7];
- проведення металографічних досліджень зразків сіток СРФ на наявність корозії [2, 3];
- вимірювання геометричних розмірів зразків сіток СРФ оптичним методом [8, 9].

При цьому, роботи за останнім пунктом спочатку проводилися на нових сітках №008, щоб отримати еталонні дані.

За результатами проведених досліджень було встановлено, що:

1. Склад катіонів на сітках з баків АТ та НДМГ практично аналогічний. Виявлені катіони металів відповідають елементам, що входять до складу сплаву алюмінію та сталі – основних конструкційних матеріалів паливної системи.

2. Сталь 12Х18Н10Т не піддається в АТ та НДМГ локальним видам корозії (піттингової, міжкристалічній, крапковій, контактній, щілинній та корозійному розтріскуванню під напругою).

3. Загальний аналіз отриманих результатів металографічних досліджень мікроструктури зразків сталі 12Х18Н10Т сіток СРФ на наявність корозії підтверджує присутність суцільного (рівномірного) корозійного враження поверхні дротів сітки.

4. Очікувана швидкість корозії нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т в АТ та НДМГ, при температурі 50°C складатиме $\leq 1 \cdot 10^{-4}$ мм/на рік (за результатами аналізу впливу різноманітних факторів на швидкість корозії).

5. Максимальна глибина мікронерівності на поверхні дротів зразків сіток, яку було виявлено складає ~ 1 мкм, що відповідає швидкості корозії $\sim 0,48 \cdot 10^{-4}$ мм/на рік.

6. За результатами вимірювання оптичним методом геометричних розмірів зразків сіток СРФ 1 і 2, що перебували в рідкій фазі КП і для СРФ 3, що перебували під парами КП, діапазон отриманих значень швидкості корозії ($V_{\tau \text{ max}}$) буде складати, мм/на рік:

- АТ СРФ 1 – $V_{\tau \text{ max}} = (0,28 \ldots 1,53) \cdot 10^{-4}$;
- АТ СРФ 2 – $V_{\tau \text{ max}} = (0,18 \ldots 1,07) \cdot 10^{-4}$;
- АТ СРФ 3 – $V_{\tau \text{ max}} = (0,40 \ldots 1,91) \cdot 10^{-4}$;
- НДМГ СРФ 1 – $V_{\tau \text{ max}} = (0,24 \ldots 1,33) \cdot 10^{-4}$;
- НДМГ СРФ 2 – $V_{\tau \text{ max}} = (0,14 \ldots 1,62) \cdot 10^{-4}$;
- НДМГ СРФ 3 – $V_{\tau \text{ max}} = (0,16 \ldots 2,13) \cdot 10^{-4}$.

Як свідчать наведені вище тези, результати різних методів дослідження швидкості корозії основного конструкційного матеріалу СРФ КЗЗСП, нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т в рідкій фазі АТ та НДМГ і під їх парами, мають дуже добру кореляцію між собою і доводять наявність суцільної (рівномірної) корозії, яка протікає з максимальною швидкістю: для АТ $\sim 1,91 \cdot 10^{-4}$ мм/на рік; для НДМГ $\sim 2,13 \cdot 10^{-4}$ мм/на рік.

У подальших інженерних розрахунках доцільніше використовувати коефіцієнт максимальної швидкості корозії, який буде визначатися: для АТ, як – $k_{\text{кор. max}} = 1 + 0,0048 \cdot \tau$; для НДМГ, як – $k_{\text{кор. max}} = 1 + 0,0053 \cdot \tau$ (де, τ – термін експлуатації СРФ КЗЗСП у складі паливної системи КЛА).

Визначення зміни КУЗ

Експериментальні випробування сіток СРФ КЗЗСП проводилися на дослідній установці. На рисунку 3, наведено схему дослідної установки [2, 3].

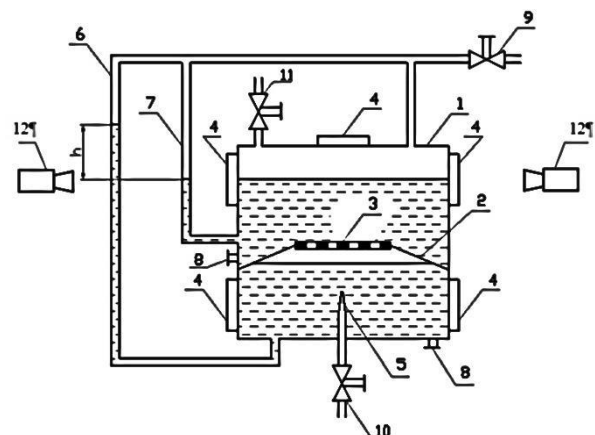


Рис. 3. Схема дослідної установки визначення КУЗ СРФ: 1 – циліндрична ємність; 2 – перегородка; 3 – СРФ; 4 – ілюмінатор; 5 – штуцер з каліброваним насадком; 6, 7 – п'єзометри; 8 – штуцер заправки/зливу; 9 – вентиль для відведення парів КП; 10 – вентиль дозованої подачі газу; 11 – вентиль наддуву верхнього відсіку; 12 – відеокамери [2, 3]

Опис конструкції дослідної установки та її робота, наведено у [2, 3].

Було випробувано 55 зразків сіток разом з еталонними. КП, що були використані, як робочі рідин, були ідентичні штатним [2, 3].

Випробування проводилися при температурах: для АТ – від плюс 1 до плюс 18°C ; для НДМГ – від плюс 1 до плюс 16°C . Загалом було проведено: 384 випробувань сіток з баків АТ, та 349 випробувань сіток з баків НДМГ, що мали термін експлуатації від 14 до 31 року [2, 3].

Оскільки конструкція КЗЗСП повинна запобігати потраплянню поодиноких бульбашок до входу у двигун, подальше визначення зміни КУЗ, в залежності від терміну їх експлуатації, проведено відповідно до отриманих експериментальних значень порушення КУЗ в наслідок масового прориву газової фази скрізь чарунки сітки.

Величина КУЗ визначається за формулою [3, 10, 11, 12]:

$$\Delta H = \frac{k \cdot \sigma}{\rho \cdot a \cdot b} \cdot \cos \theta, \quad (1)$$

де k – коефіцієнт, що враховує геометрію чарунки сітки; σ – коефіцієнт поверхневого натягу КП; ρ – густина КП; a – поздовжнє прискорення; b – розмір чарунки сітки; θ – контактний кут змочування КП з конструкційним матеріалом сітки (при проектних розрахунках, для АТ та НДМГ приймається рівним нулю).

Отриманий у результаті проведення випробувань масив експериментальних даних для сіток СРФ АТ і НДМГ, які перебували в рідкій фазі КП і під парами, апроксимували за допомогою прямої лінійної обчислювальної функції, що використовує для визначення найліпшої апроксимації даних метод найменших квадратів.

На рисунках 4 – 7 наведено по окремі графіки залежності зміни КУЗ для зразків сіток СРФ 1, 2 і 3 від температури після їх тривалого перебування в рідкій фазі і під парами КП АТ та НДМГ.

В таблиці 1 наведено дані відносно номерів комплектів зразків (КЗ) сіток СРФ, що досліджувалися і терміну їх експлуатації у складі паливних систем РН «Дніпро».

Таблиця 1

Номери КЗ сіток СРФ, що досліджувалися і термін їх експлуатації у складі паливних систем РН «Дніпро»

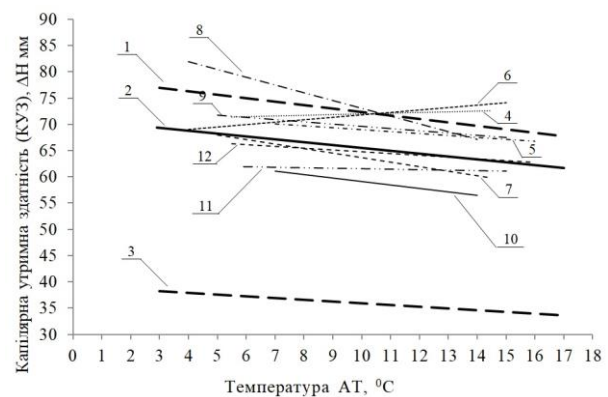
Номер КЗ сіток СРФ КЗЗСП	Термін експлуатації у складі паливної системи РН «Дніпро»
№8	14 років
№9	15 років
№10	15 років і 2 місяця
№11	15 років і 2 місяця
№12	17 років і 5 місяців
№13	20 років
№14	20 років і 10 місяців
№15	23 роки
№16	31 рік і 1 місяць

Як видно з рисунків 4 а, б і 5 внаслідок тривалого терміну перебування СРФ у рідкій фазі і під парами КП АТ:

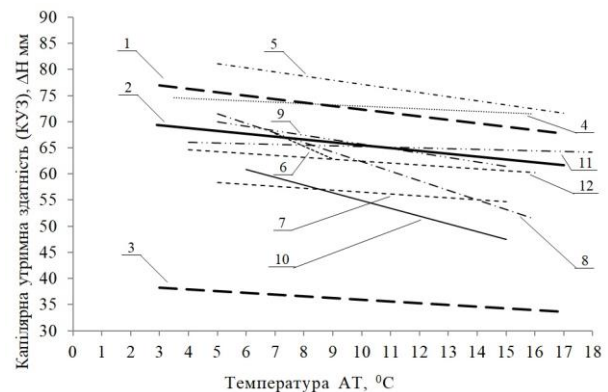
– мінімальні середньо-апроксимовані значення КУЗ не опускаються за нижню межу допуску за ТУ;

– максимальні середньо-апроксимовані значення КУЗ перевищують верхню межу допуску за ТУ (Рис. 4 а і б, пряма 1) для СРФ 1 прямі 4, 6 і 8, так як і окремі значення КУЗ для еталонних сіток;

– сумарне середньо арифметичне значення КУЗ СРФ перевищує результати випробувань еталонних (нових) зразків сіток: для АТ СРФ 1 на 2,9 %, для АТ СРФ 2 воно нижче на 2 %, а для АТ СРФ 3 є нижчим на 12,9 %.



а)



б)

Рис. 4. Графік залежності зміни КУЗ зразків сіток СРФ 1 і 2 від температури після їх тривалого перебування в рідкій фазі КП АТ: а) – рідка фаза АТ СРФ 1; б) – рідка фаза АТ СРФ 2; 1 – верхня межа допуску за ТУ (80 мкм -13%); 2 – апроксимація результатів випробувань еталонних (нових) зразків сіток; 3 – нижня межа допуску за ТУ (80 мкм +75%); апроксимація результатів випробувань СРФ: 4 – КЗ №8; 5 – КЗ №9; 6 – КЗ №10; 7 – КЗ №11; 8 – КЗ №12; 9 – КЗ №13; 10 – КЗ №14; 11 – КЗ №15; 12 – КЗ №16

Як видно з рисунків 6 а, б і 7, внаслідок тривалого терміну перебування СРФ у рідкій фазі і під парами КП НДМГ:

– мінімальні середньо-апроксимовані значення КУЗ не опускаються за нижню межу допуску за ТУ;

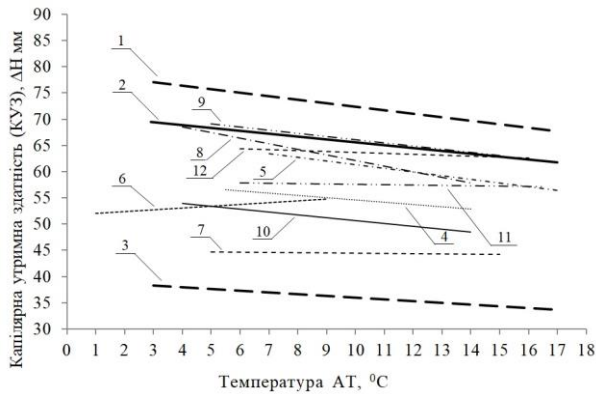


Рис. 5. Графік залежності зміни КУЗ зразків сіток СРФ 3 від температури після їх тривалого перебування під парами КП АТ: 1 – верхня межа допуску за ТУ (80 мкм -13%); 2 – апроксимація результатів випробувань еталонних (нових) зразків сіток; 3 – нижня межа допуску за ТУ (80 мкм +75%); апроксимація результатів випробувань СРФ: 4 – КЗ №8; 5 – КЗ №9; 6 – КЗ №10; 7 – КЗ №11; 8 – КЗ №12; 9 – КЗ №13; 10 – КЗ №14; 11 – КЗ №15; 12 – КЗ №16

– максимальні середньо-апроксимовані значення КУЗ не перевищують верхню межу допуску за ТУ;

– сумарне середньо арифметичне значення КУЗ СРФ нижче за результати випробувань еталонних (нових) зразків сіток: для НДМГ СРФ 1 на 5,9%, для НДМГ СРФ 2 на 11,2 % та для НДМГ СРФ 3 на 21 %.

Для більш практичного використання отриманих даних доцільно застосування методів теорії подібності відносно зміни КУЗ сіток СРФ відповідно до терміну їх експлуатації.

Оскільки прорив газу під сітку СРФ у статичних умовах визначається співвідношенням діючих на рідину сил – капілярних і гідростатичних, для характеристики процесів, що відбуваються під впливом цих сил в гідромеханіці використовують безрозмірний комплекс – число Бонда (Bo).

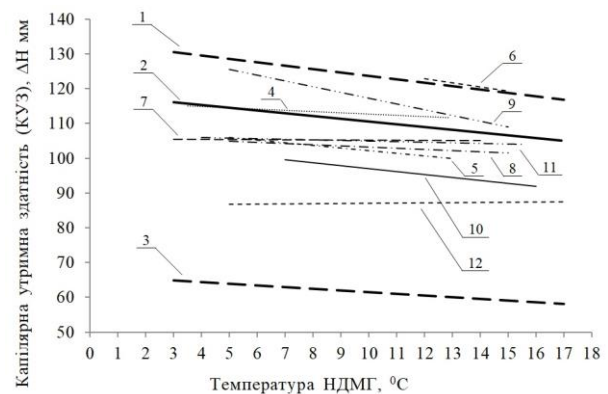
Відповідно до теорії подібності, для всякої сукупності явищ всі безрозмірні комплекси мають однакові чисельні значення [13]. Таким чином для геометрично подібних конструкцій СРФ (що мають однаковий тип плетіння і форму перерізу дроту) процес прориву газу відбувається за цілком визначеним та постійним значенням числа $Bo = Bo_{кр}$ [13].

Безрозмірний комплекс критичного числа Бонда, відносно до СРФ на які впливає прискорення дорівнює [10]:

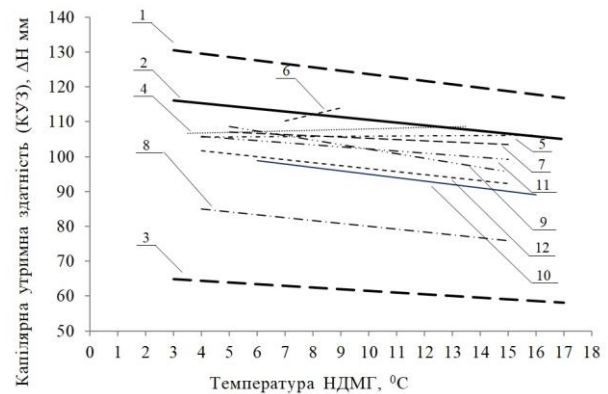
$$Bo_{кр} = \frac{\rho \cdot a \cdot \Delta H \cdot b}{\sigma \cdot \cos \theta} \quad (2)$$

Оскільки з умов подоби $Bo_{кр}$ зберігається постійним, він дорівнює k з рівняння (1) і визначає граничну висоту стовпа рідини, що утримує СРФ. Таким чином $Bo_{кр}$ – є постійною величиною, яка не залежить від фізичних властивостей рідини, перевантаження і розміру чарунок сітки. Для кожного типу конструкції СРФ вона визначається за допомогою експерименту.

Як найбільш точніше визначення $Bo_{кр}$ суттєво впливає на оптимальність закладених параметрів СРФ при проектуванні капілярних ЗЗС палива і можливо, лише за даними експериментального відпрацювання конкретної сітки та КП, що будуть використані в КЛА, який проектується [1].



а)



б)

Рис. 6. Графік залежності зміни КУЗ зразків сіток СРФ 1 і 2 від температури після їх тривалого перебування в рідкій фазі КП НДМГ: а) – рідка фаза НДМГ СРФ 1; б) – рідка фаза НДМГ СРФ 2; 1 – верхня межа допуску за ТУ (80 мкм -13%); 2 – апроксимація результатів випробувань еталонних (нових) зразків сіток; 3 – нижня межа допуску за ТУ (80 мкм +75%); апроксимація результатів випробувань СРФ: 4 – КЗ №8; 5 – КЗ №9; 6 – КЗ №10; 7 – КЗ №11; 8 – КЗ №12; 9 – КЗ №13; 10 – КЗ №14; 11 – КЗ №15; 12 – КЗ №16

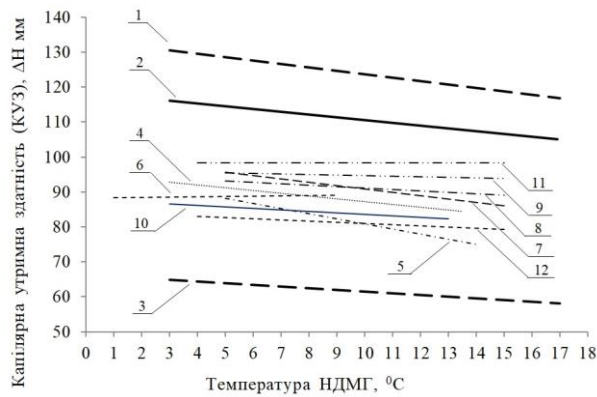


Рис. 7. Графік залежності зміни КУЗ зразків сіток СРФ 3 від температури після їх тривалого перебування під парами КП НДМГ: 1 – верхня межа допуску за ТУ (80 мкм -13%); 2 – апроксимація результатів випробувань еталонних (нових) зразків сіток; 3 – нижня межа допуску за ТУ (80 мкм +75%); апроксимація результатів випробувань СРФ: 4 – КЗ №8; 5 – КЗ №9; 6 – КЗ №10; 7 – КЗ №11; 8 – КЗ №12; 9 – КЗ №13; 10 – КЗ №14; 11 – КЗ №15; 12 – КЗ №16

Для визначення залежності $Vo_{кр}$, при якому порушується рівновага зовнішніх та внутрішніх сил на ПРФ капіляру в чарунці сітки у статичних умовах, данні наведені у [10] було доповнено результатами експериментальних досліджень КУЗ для нових сіток на КП АТ і НДМГ), а також даними які були отримані при проектуванні капілярних ЗЗС палива для РН «Циклон-4» [14, 15], та інших науково дослідних роботах [16].

В результаті чого було отримано нову, уточнену залежність осередненого значення $Vo_{кр}$ від температури КП (при $\theta = 0$), яка дорівнює:

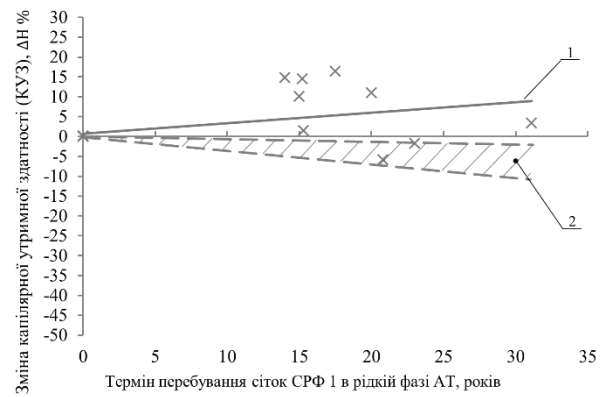
$$Vo_{кр} = 2,72 - 0,012 \cdot T, \quad (3)$$

де T – температура КП.

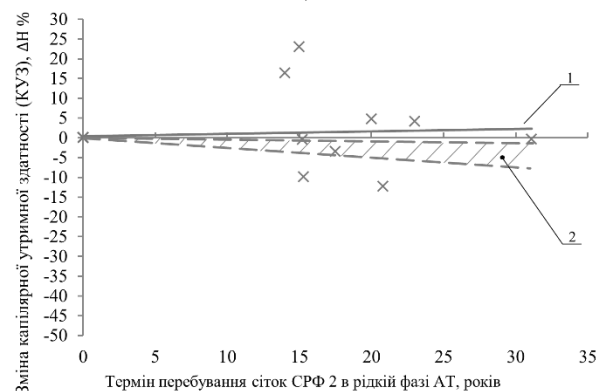
За допомогою визначеного у рівнянні (3) значення $Vo_{кр}$ (для нових сіток СРФ), яке при температурі КП 10°C буде дорівнювати 2,6 побудовано графіки лінійної регресії зміни апроксимованих значень КУЗ АТ і НДМГ СРФ 1, 2 і 3 за часом, відносно діапазону максимальних швидкостей корозійного враження дротів сіток СРФ, що були наведені раніше.

На рисунках 8 і 9 наведено графіки лінійної регресії зміни апроксимованих значень КУЗ АТ і НДМГ СРФ 1, 2 за часом.

На рисунку 10 наведено графіки лінійної регресії зміни апроксимованих значень КУЗ АТ і НДМГ СРФ 3 за часом.



а)



б)

Рис. 8. Лінійна регресія зміни апроксимованих значень КУЗ СРФ АТ 1, 2 за часом: а) – зміна КУЗ сіток СРФ 1, що перебували в рідкій фазі АТ, за часом; б) – зміна КУЗ сіток СРФ 2, що перебували в рідкій фазі АТ за часом; 1 – пряма зміни КУЗ за результатами експериментальних відпрацювань (ЕВ) сіток СРФ 1 і 2; 2 – межі зміни КУЗ за часом, внаслідок корозійних вражень дротів сіток; х – результати ЕВ

Аналіз результатів досліджень

Результати проведених досліджень свідчать, що:

- зміна КУЗ сіток СРФ АТ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі КП, відповідно, на 11% і 3% менше за верхні межі ймовірних змін КУЗ внаслідок корозійних вражень дротів сіток при вимірюваному діапазоні максимальної швидкості корозії для СРФ 1 – $V_{\tau \max} = (0,28 \dots 1,53) \cdot 10^{-4}$ мм/на рік, для СРФ 2 – $V_{\tau \max} = (0,18 \dots 1,07) \cdot 10^{-4}$ мм/на рік.
- результати експериментального визначення зміни КУЗ сіток СРФ АТ 3, які перебували під парами КП, співпадають з даним по зміні КУЗ в наслідок корозійних вражень дротів сітки при вимірюваному діапазоні максимальної швидкості корозії: для СРФ 3 – $V_{\tau \max} = (0,40 \dots 1,91) \cdot 10^{-4}$ мм/на рік;

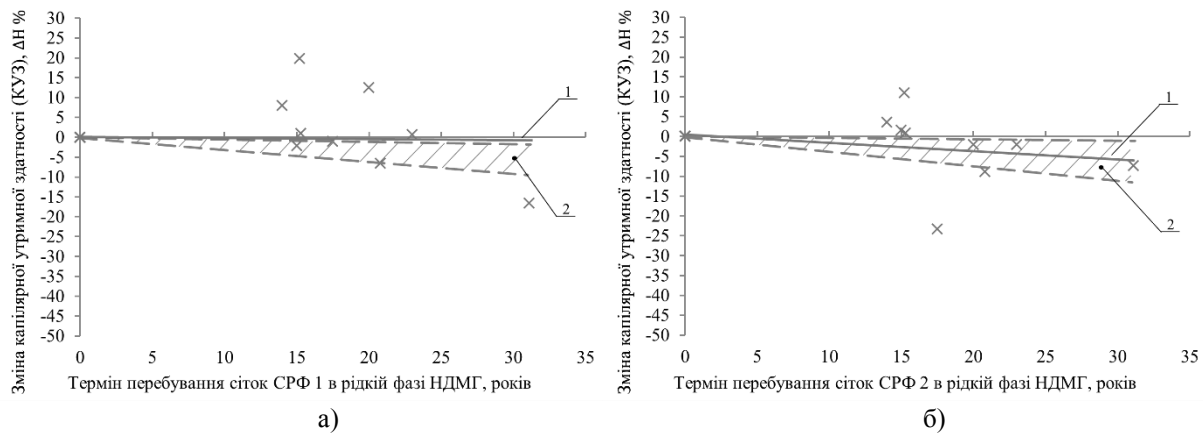


Рис. 9. Лінійна регресія зміни апроксимованих значень КУЗ СРФ НДМГ 1, 2 за часом: а) – зміна КУЗ сіток СРФ 1, що перебували в рідкій фазі НДМГ, за часом; б) – зміна КУЗ сіток СРФ 2, що перебували в рідкій фазі НДМГ за часом; 1 – пряма зміни КУЗ за результатами ЕВ сіток СРФ 1 і 2; 2 – межі зміни КУЗ за часом, внаслідок корозійних вражень дротів сіток; х – результати ЕВ

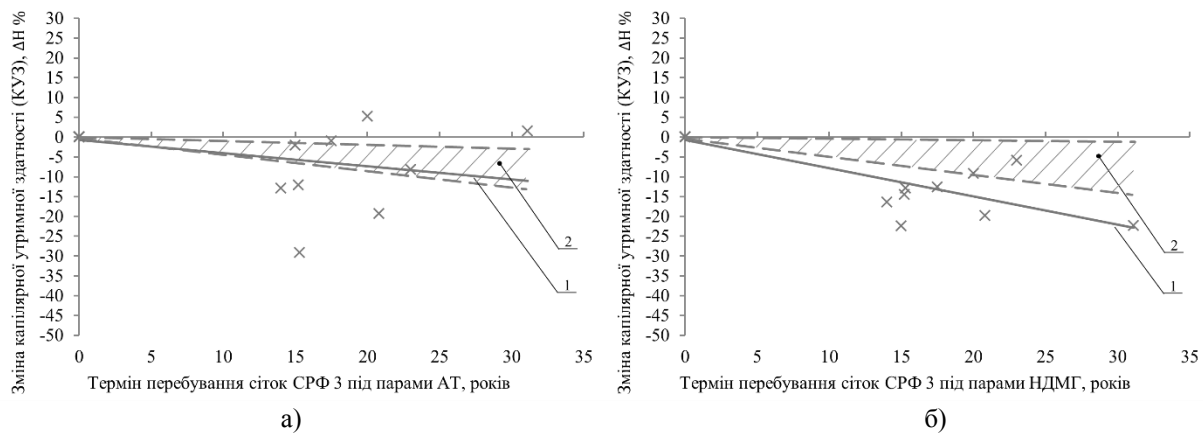


Рис. 10. Лінійна регресія зміни апроксимованих значень КУЗ СРФ АТ і НДМГ 3 за часом: а) – зміна КУЗ сіток СРФ 3, що перебували під парами АТ, за часом; б) – зміна КУЗ сіток СРФ 3, що перебували під парами НДМГ, за часом; 1 – пряма зміни КУЗ за результатами ЕВ сіток СРФ 3; 2 – межі зміни КУЗ за часом, внаслідок корозійних вражень дротів сіток СРФ; х – результати ЕВ

– результати експериментального визначення зміни КУЗ сіток СРФ НДМГ 1 і 2, які перебували в рідкій фазі КП, співпадають з даним по зміні КУЗ в наслідок корозійних вражень дротів сітки при вимірюваному діапазоні максимальної швидкості корозії: для СРФ 1 – $V_{\tau \max} = (0,24 \dots 1,33) \cdot 10^{-4}$ мм/на рік; для СРФ 2 – $V_{\tau \max} = (0,14 \dots 1,62) \cdot 10^{-4}$ мм/на рік;

– результати експериментального визначення зміни КУЗ сіток СРФ НДМГ 3, які перебували під парами КП, відрізняються від даних по зміні КУЗ отриманих для сіток СРФ, що перебували в рідкій фазі відповідних КП і не співпадають з даним по зміні КУЗ в наслідок корозійних вражень дротів сітки, перевищуючи їх максимальну межу – $V_{\tau \max} = (0,16 \dots 2,13) \cdot 10^{-4}$ мм/на рік (для 31 року експлуатації) на ~ 8 %.

Походячи з отриманих результатів ЕВ, для визначення КУЗ сіток СРФ КЗЗСП, що тривалий термін перебувають в рідкому ракетному КП (АТ та НДМГ) і під його парами формула (1) буде мати вигляд:

$$\Delta H = \frac{Bo_{\text{кр}} \cdot \sigma}{\rho \cdot a \cdot (b + 2V_{\text{кор.т}})} \cdot \cos \theta. \quad (4)$$

Якщо виразити КУЗ через величину капілярного тиску, що буде утримувати сітка СРФ, то матимемо:

$$\Delta P = \frac{Bo_{\text{кр}} \cdot \sigma}{(b + 2V_{\text{кор.т}})} \cdot \cos \theta, \quad (5)$$

або,

$$\Delta P = \frac{Bo_{\text{кр}} \cdot \sigma}{(b \cdot k_{V_{\text{кор.макс}}})} \cdot \cos \theta. \quad (6)$$

У (4), (5) і (6) значення $Bo_{\text{кр}}$ буде відповідати (3). Збільшення чарунки сітки b за рахунок зменшення її дротів, в наслідок корозійних процесів для сіток СРФ, що будуть тривалий термін перебувати в рідкій фазі

АТ та НДМГ і під парами визначимо через коефіцієнт максимальної швидкості корозії: для сіток СРФ АТ – $k_{\text{кор. max}} = 1 + 0,0048 \cdot \tau$, для сіток СРФ НДМГ – $k_{\text{кор. max}} = 1 + 0,0053 \cdot \tau$.

Значення контактного куту змочування для сіток СРФ, що будуть тривалий термін перебувати в рідкій фазі АТ і під парами, буде дорівнювати 0° , тобто $\cos \theta = 1$.

За результатами експерименту, для сіток СРФ, що тривалий термін перебували під парами НДМГ на 31 рік середньо арифметичне значення контактного куту змочування дорівнює $\sim 25^\circ$, тобто, якщо уявити, що його зміна відбувалася лінійно можемо записати це у вигляді лінійної регресії:

$$\theta = 0,8065 \cdot \tau. \quad (7)$$

Для використання при проектуванні КЗЗСП, які будуть тривалий термін перебувати в рідкій фазі АТ або НДМГ і під їх парами формула (6) буде мати вигляд:

– для РУ, що використовують АТ у якості окислювача:

$$\Delta P_{\text{АТ}} = \frac{(2,72 - 0,012 \cdot T) \cdot \sigma}{b \cdot (1 + 0,0048 \cdot \tau)}, \quad (8)$$

– для РУ, що використовують НДМГ у якості пального:

$$\Delta P_{\text{АТ}} = \frac{(2,72 - 0,012 \cdot T) \cdot \sigma}{b \cdot (1 + 0,0053 \cdot \tau)} \cdot \cos(0,8065 \cdot \tau). \quad (9)$$

Обговорення

Як було наведено у **аналізі**, КУЗ СРФ 1 і 2 в АТ з часом підвищується. Причиною цього може бути те, що сітки СРФ 1 і 2 були найбільш забруднені і окрім нальоту, плям, крапель неметалевої речовини, крупинок мали в окремих чарунках сітки рижуваті пластівці, які не перевищували за розміром одиничної чарунки, також зустрічались частки з металевим блиском, розміром у 2 – 3 чарунки. При цьому, масштаб цих забруднень для деяких сіток досягав 50% від їх робочої площі. Забруднення сіток зменшує ЕКД порі, як наслідок, підвищує КУЗ сіток СРФ, незважаючи на збільшення загального розміру чарунок в результаті корозійного враження дротів сіток. Опосередковано це підтверджується і результатами аналізу хімічного складу речовин, що знаходяться на поверхні зразків сіток СРФ 1 і 2 з баку окислювача.

На рисунку 11, як зразок, наведено фотографію зовнішнього вигляду СРФ 1 бака окислювача комплексу зразків сіток №8, після 7 днів витримки сітки

в АТ і випробувань з визначення КУЗ, та її дослідження під мікроскопом, при збільшенні у 160 крат.

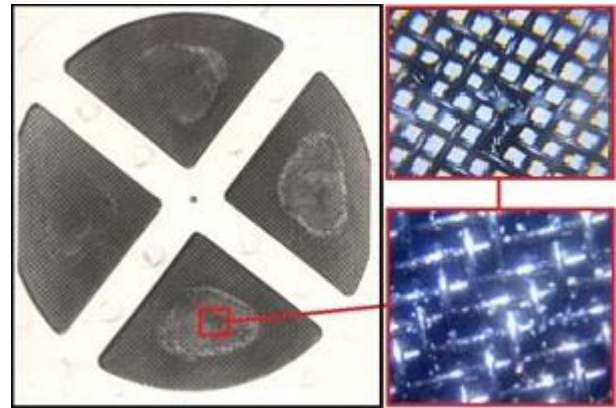


Рис. 11. Фотографія зовнішнього вигляду СРФ 1 бака окислювача комплексу зразків сіток №8, після 7 днів витримки сітки в АТ і випробувань з визначення КУЗ, та її дослідження під мікроскопом, при збільшенні у 160 крат

Це може свідчити про вплив на КУЗ зміни значення контактного куту змочування θ для ПРФ «КП – матеріал сіток СРФ», внаслідок тривалого впливу суміші парів КП з газом наддування, та газоподібних продуктів хімічних реакцій взаємодії КП з конструкційними матеріалами паливного баку.

Виходячи з гіпотези, що значення контактного куту змочування, внаслідок тривалого знаходження СРФ під парами НДМГ перестає дорівнювати нулю [3, 10, 17, 18], за формулою (1) середнє арифметичне значення θ за 31 рік зміниться з нуля до $\sim 25^\circ$ (при розмірі чарунки 93,2 мкм, замість 80 мкм, відповідно до $V_{\tau \text{ max}} = 2,13 \cdot 10^{-4}$ мм/на рік).

Причини непередбачуваної зміни θ вимагають додаткового вивчення та аналізу. Так само, як і причини виходу значень КУЗ за верхню межу розрахункового допуску, як для СРФ 1 і 2, що тривалий час перебували у рідкій фазі АТ, так і для еталонних сіток. Ці явища не можуть бути повною мірою пояснені застосуванням сіток. Підвищення значень КУЗ не є однозначно позитивним чинником, так як має розглядатися в рамках функціонування всієї ПГС ступеня, оскільки може призводити до підвищення опору СРФ [2, 3].

Найбільш ймовірною причиною збільшення контактного куту змочування може бути граничний випадок адгезії (виникнення міжмолекулярної взаємодії між поверхневими шарами твердих й рідких тіл), так звана – хемосорбція, що протікає з утворенням на поверхні металу плівки хімічних з'єднань. Наявність саме таких плівок було виявлено при дефектації сіток СРФ.

Висновки

За результатами розрахунково-аналітичних та експериментальних робіт було:

- визначено, що результати різних методів дослідження швидкості корозії основного конструкційного матеріалу СРФ КЗЗСП, нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т в рідкій фазі АТ та НДМГ і під їх парами, мають дуже добру кореляцію між собою і доводять наявність суцільної (рівномірної) корозії, яка протікає з максимальною швидкістю: для АТ $\sim 1,91 \cdot 10^{-4}$ мм/на рік; для НДМГ $\sim 2,13 \cdot 10^{-4}$ мм/на рік;
- проведено ЕВ КУЗ сіток СРФ, що тривалий термін перебували в рідкій фазі АТ та НДМГ і під їх парами. За результатами ЕВ були отримані залежності зміни КУЗ від терміну експлуатації;
- удосконалено формули вибору основних проектних параметрів КЗЗСП за рахунок уточнення традиційних підходів до розрахунку КУЗ СРФ. Ці формули доцільно використовувати при проектуванні КЗЗСП, які будуть тривалий термін перебувати в рідкій фазі АТ або НДМГ і під їх парами.

У підсумку, використання підсумкових формул (8) та (9) дозволяє з більшою точністю, ніж це було раніше, розрахувати значення статичної КУЗ, яка виражена через величину капілярного тиску, що буде утримувати сітка СРФ і тим самим оптимізувати та зробити більш досконалою й надійною кінцеву конструкцію КЗЗСП, що проектується.

Майбутні дослідження повинні бути спрямовані на визначення: дій спрямованих на виключення (або зменшення) засмічення сіток СРФ протягом тривалого терміну експлуатації; визначення наявності та впливу механічної деформації структури плетіння сіток (розміру чарунок), внаслідок вібрацій, гідроударів та ін., (обумовлених роботою двигунів КЛА); визначення причини непередбачуваної зміни θ .

Література

1. Капиллярные системы отбора жидкости из баков космических летательных аппаратов [Текст] / В. В. Багров, А. В. Курпатенков, В. М. Поляев и др.; под. ред. В. М. Поляева. – М. : УНПЦ «ЭНЕРГОМАШ», 1997. – 328 с.
2. Minai, O. Influence of long-term stay elements of capillary intake devices in liquid propellant components on their parameters [Text] / O. Minai, O. Ivanov, I. Siedyk // *Aerospace Research in Bulgaria*. – 2020. – Vol. 32. – P. 175-192. DOI: 10.3897/arb.v32.e15.
3. Мінай, О. М. Зміна капілярної утримної здатності засобів забезпечення суцільності палива в наслідок їх тривалого терміну експлуатації [Текст] / О. М. Мінай // *Вісник ДНУ. Серія: ракетно-космічна*

техніка, зб. наук. пр. – Т. XXXI – Дніпро, 2023. – С. 58-73. DOI: 10.15421/452306.

4. Screen Compliance Experiments for Application of Liquid Acquisition Device in Space [Text] / C. Camarroti, O. Deng, S. Darr, J. Hartwig, J. N. Chung // *Microgravity Science and Technology*. – 2019. – Vol. 31. – P. 109-122.

5. NASA Glenn Research Center Creek Road Cryogenic Complex: Testing between 2005 – 2019 [Text] / J. Hartwig, W. Johnson, H. Bamberger, M. Meyer, J. Wendell, J. Mullins, R. C. Robinson, L. Arnett // *Cryogenics*. – 2020. – Vol 106. – P. 1-12.

6. Сітка ткани з квадратними осередками мікронних розмірів [Текст]: Технічні умови: ТУ 14-507-99. – Утримувач оригіналу ВАТ «Сонячногірський завод металевих сіток ЛЕПІСЕ», 1999. – 2 с.

7. Отчет об опытно-конструкторской работе «Анализ опыта заправок-сливов на высококипящих компонентах топлива (Амил, Гентил)» [Текст]: ФГУП «РНЦ «Прикладная химия». – Санкт-Петербург, 2005. – 46 с.

8. Minai, O. M. Prediction of performance of mesh phase separators in GEO satellite capillary intake devices [Text] / O. M. Minai // 74-st International Astronautical Congress. Baku, Azerbaijan, 02 – 06 Oktober 2023. – Technical Presentation and Conference Paper IAC – 23,A2,4,4x76632 – 10 p.

9. Мінай, О. М. Вплив на капілярну утримну здатність сітчастих роздільників фаз їх тривалого перебування у компонентах ракетного палива [Текст] / О.М. Мінай // *Людина і космос: зб. тез XXV Міжнарод. молодіж. наук.-практ. конф.*, Дніпро, 2023. – С. 122-123.

10. Шевченко, Б. А. Расчетный и экспериментальный метод разработки средств забора компонентов топлива из баков летательных аппаратов с жидкостным ракетным двигателем [Текст]: дис. канд. тех. наук : 05.07.02 / Шевченко Борис Алексеевич; Днепропетровск, КБ «Южное». – Днепропетровск, 1990. – 209 с.

11. Hartwig, J. W. Liquid acquisition devices for advanced in space cryogenic propulsion systems [Text] / J. W. Hartwig. – Elsevier Inc., 2015. – 488 p.

12. Fouad, A. On the pressure drop of fluids through woven screenmeshes [Text] / A. Fouad // *Chemical engineering science*. – 2019. – Vol. 201. – 464 p. DOI: 10.1016/j.ces.2019.06.046.

13. Седов, Л. И. Методы теории размерностей и теории подобия в механике [Текст] / Л. И. Седов. – М. : ОГИЗ, 1944. – 136 с.

14. Minai, O. Choice of the optimum design of lateral PMD using the CFD method [Text] / O. Minai, I. Kuzmich // *Aerospace Research in Bulgaria*. – 2023. – Vol. 35. – P. 128-144. DOI: 10.3897/arb.v35.e13.

15. Кузьміч, І. Ю. Вибір оптимальної конструкції забірної пристрою у баку пального першого ступеню ракети-носія «Циклон-4» [Текст] / І. Ю. Кузьміч, О. М. Мінай // *Авіаційно-космічна техніка й технологія*. – 2022. – № 1 (177). – С. 25-33. DOI: 10.32620/aktt.2022.1.03.

16. Котерев, В. А. Возможности использования поверхностных сил жидких топлив в системах питания двигателей в условиях невесомости [Текст] / В. А. Котерев, Ю. М. Щипунов // *Технический отчет № 341*. – ЛПИИ, 1967. – 41с.

17. Hartwig, J. W. The static bubble point pressure model for cryogenic screen channel liquid acquisition devices [Text] / J. W. Hartwig, Ya. Kamotani // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2016. – Vol. 201. – 16 p. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.024.

18. Fester, D. A. Surface tension propellant acquisition system technology for Space Shuttle reaction control tank [Text] / D. A. Fester, A. S. Villars, P. E. Uney // *In: 11th AIAA and SAE Propulsion conference, 1974*. – 8 p.

References

1. Bagrov, V. V., Kurpatenkov, A. V., Polyayev, V. M. et al. Kapillyarnye sistemy otbora zhidkosti iz bakov kosmicheskikh letatel'nykh apparatov [Capillary liquid extraction systems from the tanks of space aircraft]. Moscow, UNPC "ENERGOMASH", 1997. 328 p. (in Russian).

2. Minai, O., Ivanov, O., & Siedykh, I. Influence of long-term stay elements of capillary intake devices in liquid propellant components on their parameters. *Aerospace Research in Bulgaria*, 2020, vol. 32, pp. 175-192. DOI: 10.3897/arb.v32.e15.

3. Minai, O. M. Zmina kapiliarnoi utrymnoi zdatsi zasobiv zabezpechennia sutsilnosti palyva v naslidok yikh tryvalocho terminu ekspluatatsii [Change in the capillary retention capacity of means of ensuring fuel integrity as a result of their long service life]. *Visnyk DNU. Seriya: raketno-kosmichna tekhnika, zb. nauk. pry.* – *Herald of DNU. Series: rocket and space technology, coll of science avenue*, 2023, vol. XXXI, pp. 58-73. DOI: 10.15421/452306. (in Ukraine).

4. Camarotti, C., Deng, O., Darr, S., Hartwig, J., & Chung, J. N. Screen Compliance Experiments for Application of Liquid Acquisition Device in Space. *Microgravity Science and Technology*, 2019, vol. 31, pp. 109-122.

5. Hartwig, J., Johnson, W., Bamberger, H., Meyer, M., Wendell, J., Mullins, J., Robinson, R. C., & Arnett, L. NASA Glenn Research Center Creek Road Cryogenic Complex: Testing between 2005 – 2019. *Cryogenics*, 2020, vol 106, pp. 1-12.

6. Sitka tkana z rvadratnymi oseredkamy mikronnykh rozmiriv [Mesh woven with square cells of micron size]: *Tekhnichni umovy* – Technical conditions: TC 14-4-507-99. *Otrymuвач oryhinalu VAT "Sonyachnohirskyi zavod metalevykh sitok LEPSE"* – Holder of the original of OJSC "Sonyachnohirsky Plant of Metal Meshes LEPSE" Publ., 1999. 2 p. (in Ukraine).

7. Otchot ob opytно-rjystruktorskoj rabote «Analiz napravok-slivov na vysokokipyshih komponentah topliva (Amil, Heptil)» [Report on experimental design work "Analysis experience of filling stations with plums on high-boiling fuel components (Amyl, Heptyl)"]. St. Petersburg, FGUP "RNC" Prikladnaya himiya" Publ., 2005. 46 p. (in Russian).

8. Minai, O. M. Prediction of performance of mesh phase separators in GEO satellite capillary intake devices. *74th International Astronautical Congress*. Baku, Azerbaijan, 02 – 06 October 2023, – *Technical Presentation and Conference Paper IAC* – 23, A2, 4, 4x76632. 10 p.

9. Minai, O. M. Vplyv na kapiliarnu utrymnu zdatsi sitchastykh rozdilnykiv faz yikh tryvalocho perebuvannia u komponentakh raketnoho palyva [Effect on the capillary retention capacity of mesh phase separators of their long stay in rocket fuel components]. *Liudyna I kosmos: zb. tez. XXV Mizhnarod. molodizh. nauk.-prakt. konf.* – *Man and space: collection. theses XXV International youth science and practice conference*, Dnipro, 2023, pp. 122-123. (in Ukraine).

10. Shevchenko, B. A. Raschetnyj i jeksperimental'nyj metod razrabotki sredstv zabora komponentov topliva iz bakov letatel'nykh apparatov s zhidkostnym raketnym dvigatelem [Estimated and experimental method for the development of means for collecting fuel components from tanks of aircraft with a liquid rocket engine]. *dis. kand. teh. nauk.* Dnepropetrovsk, KB «Ju-zhnoe» Publ., 1990. 209 p. (in Russian).

11. Hartwig, J. W. *Liquid acquisition devices for advanced in space cryogenic propulsion systems*. Elsevier Inc. Publ., 2015. 488 p.

12. Fouad, A. On the pressure drop of fluids through woven screen meshes. *Chemical engineering science*, 2019, vol. 201. 464 p. DOI: 10.1016/j.ces.2019.06.046.

13. Sedov, L. I. *Metody teorii razmernostej I teorii podobiya v mehanike* [Methods Similarity and Methods Proportionality in Mechanics]. Moscow, OGIz Publ., 1944. 136 p. (in Russian).

14. Minai, O., & Kuzmich, I. Choice of the optimum design of lateral PMD using the CFD method. *Aerospace Research in Bulgaria*, 2023, vol. 35, pp. 128-144. DOI: 10.3897/arb.v35.e13.

15. Kuzmich, I. Yu., & Minai, O. M. Vybir optymalnoi konstruktsii zabirnoho prystroiu u baku palnoho pershoho stupeniu rakety-nosiia «Tsyklon-4» [Choosing the optimal design of the intake device in the

fuel tank of the first stage of the "Zyklon-4" launch vehicle]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2022, no. 1 (177), pp. 25-33. DOI: 10.32620/aktt.2022.1.03. (in Ukraine).

16. Koterev, V. A., & Shchipunov, Yu. M. *Vozmozhnosti ispolzovaniya poverhnostnyh sil zhidkih topliv v sistemah dvigatelej v usloviyah nevesomosti* [Possibilities of using surface forces of liquid fuels in engine power systems in weightlessness]. *Tekhnicheskij otchet № 341 – Technical report No. 341*, LII Publ., 1967. 41 p. (in Russian).

17. Hartwig, J. W., & Kamotani, Ya. The static bubble point pressure model for cryogenic screen channel liquid acquisition devices. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 201. 16 p. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.024.

18. Fester, D. A., Villars, A. S., & Uney, P. E. Surface tension propellant acquisition system technology for Space Shuttle reaction control tank. *11th AIAA and SAE Propulsion conference*, 1974. 8 p.

Надійшла до редакції 10.09.2023, розглянута на редколегії 20.11.2023

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF CHANGES IN CAPILLARY HOLDING CAPACITY OF MESH PHASE SEPARATORS

Oleksandr Minai

The subject of this study is the process of loss of capillary holding capacity (CHC) as a result of a violation of the balance of external and internal forces on the phase interface (PI) "liquid - gas" of the capillary in the cell of the mesh phase separator (MPS) of the capillary means for ensuring the integrity of the fuel (CMEIF) with a long service life in chemically aggressive fuel components (FP): nitrogen tetroxide (NT) and asymmetric dimethylhydrazine (NDMH). **The goal** is to improve the selection of design parameters of the CMEIF through the refinement of traditional approaches to the calculation of the CHC MPS depending on the term of their operation. **Task:** to determine the rate of corrosion of the main structural material of the MPS - steel nets of the twill weave type, and its effect on the structural and geometric characteristics of the nets; to perform an experimental determination of the change in the MPS CHC; to improve the mathematical model for determining the MPS CHC, considering the term of their operation as part of the fuel system of space flight vehicles (SFV). **The methods** used are as follows: to determine the rate of corrosion - metallographic studies and measurement of the geometric dimensions of mesh samples; to determine the change in CHC - the bubble method. The following **results were obtained**. The coefficient of the maximum corrosion rate was determined. A new, refined dependence of the average value of Bo_{cr} on the temperature of the FP was obtained. Linear regressions of changes in the approximated values of CHC MPS depending on the duration of their operation were obtained. An increase in the average arithmetic value of the wetting contact angle θ in the NDMG over 31 years of MPS operation was determined. An improved mathematical model for determining the CHC of MPS was obtained, considering the period of their operation in JSC and NDMH. **Conclusions**. The scientific novelty of the obtained results is as follows: for the first time, comprehensive studies were carried out to determine the rate of corrosion of the main structural material of MPS after a long period of their stay (from 14 to 31 years) in FP (NT and NDMG) and under their pairs, the results of which revealed regularities of flow corrosion processes in the liquid and gas phase, established corrosion rates and deduced coefficients, the application of which improves the engineering methods of calculating the main parameters of MPS; the physical model for calculating Bo_{kr} received further development; the physical model for calculating the CHC has been improved, which makes it possible to calculate the value of the static CHC of the MPS with greater accuracy than it was before and to make the final design of the designed CMEIF more perfect and reliable.

Keywords: space flight vehicles; microgravity; means of fuel integrity; mesh phase separator; corrosion; wetting contact angle; capillary holding capacity; microstructure; engine; reusable space systems.

Мінай Олександр Миколайович – начальник сектору, ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля», Дніпро, Україна.

Oleksandr Minai – Sector Leader in Yuzhnoye State Design Office, Dnipro, Ukraine, e-mail: minayan1976@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4180-0149.